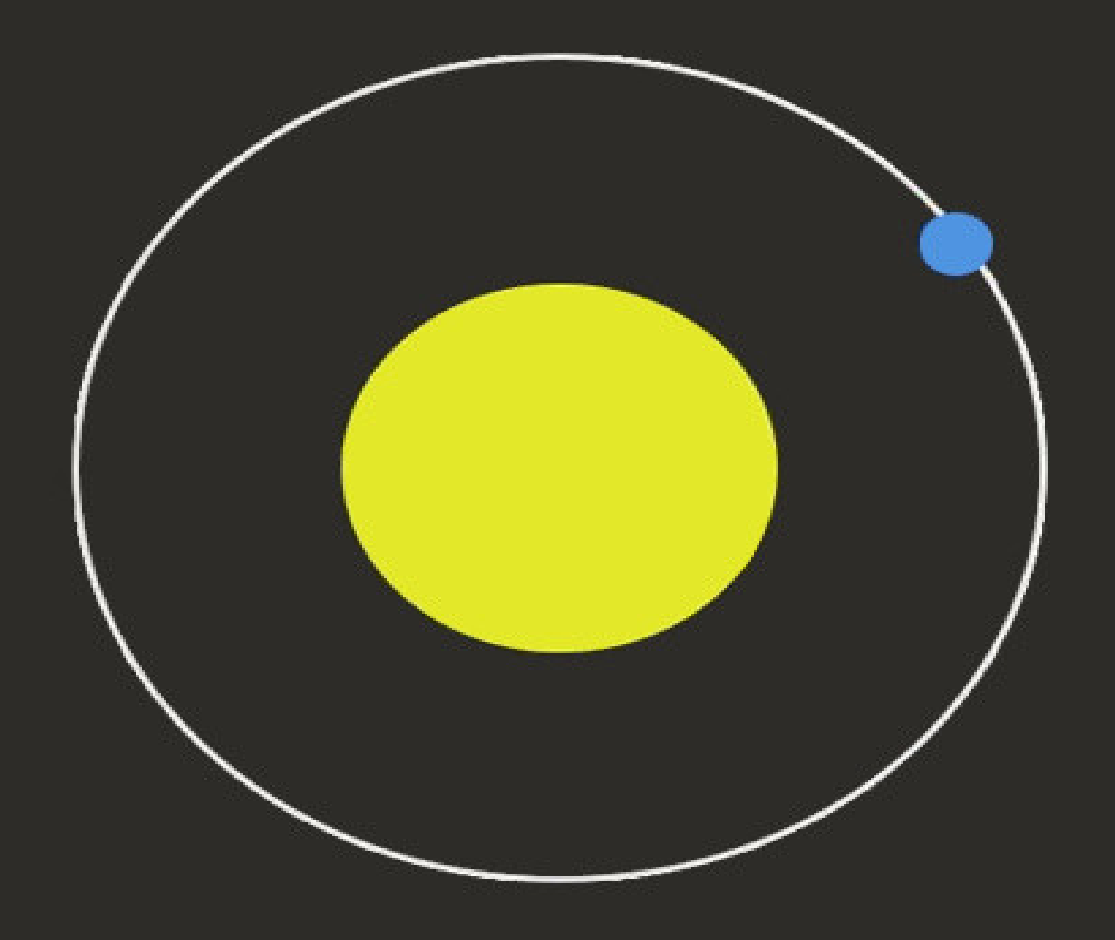


Thomas S. Kuhn

La revolución copernicana

La astronomía planetaria en el desarrollo del pensamiento occidental



La presente obra muestra que la revolución copernicana no ha perdido su valor en la actualidad. Por tratarse de un acontecimiento en el desarrollo de la actividad intelectual, en el que se pone de manifiesto que la solución de un problema científico puede producir un cambio radical en las actitudes y formas de pensamiento de la humanidad, el análisis de los procesos intelectuales que constituyen la base de dicha revolución nos permite alcanzar una nueva perspectiva en nuestra era científica, para valorar de un modo más inteligente nuestras propias creencias, los fundamentos de nuestra metodología y, en general, todo lo que afecta a la creatividad humana. Thomas S. Kuhn, cuya obra *La estructura de las revoluciones* científicas ha marcado un hito de gran trascendencia en la filosofía de la ciencia actual, expone en su *revolución copernicana* el contenido y significado de este hecho, no sólo como un episodio interno de la astronomía, sino como un punto de partida de la crisis del pensamiento occidental y de la transformación del concepto del hombre y de su relación con el universo.



Thomas S. Kuhn

La revolución copernicana

La astronomía planetaria en el desarrollo del pensamiento occidental

ePub r1.0

Antwan 19.10.13

Título original: *The Copernican Revolution. Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*
Thomas S. Kuhn, 1957
Traducción: Domènec Bergadà
Diseño de portada: Antwan

Editor digital: Antwan
ePub base r1.0



A L. K. Nash,
agradeciéndole su intensa colaboración

PREFACIO

No es la primera vez que se emprende el estudio de la revolución copernicana, pero nunca, por cuanto se me alcanza, con idéntico enfoque y objetivos que los que presiden la presente obra. Aunque la palabra revolución es aquí un nombre singular, el acontecimiento fue plural. En su núcleo constituyó una transformación de la astronomía matemática, aunque implicó también cambios conceptuales en los terrenos de la cosmología, física, filosofía y religión. Tales aspectos particulares de la revolución han sido examinados repetidas veces, y sin los resultados expuestos en los correspondientes estudios nunca habría podido ser escrito este libro. La pluralidad de la revolución copernicana desborda la competencia de cualquier erudito aislado que decida trabajar sobre las fuentes originales. Tanto los estudios especializados como los trabajos elementales en ellos inspirados no aciertan a hacer resaltar la más esencial y fascinante de sus características, precisamente la que emerge de la propia pluralidad de la revolución.

A causa de la indicada pluralidad de ámbitos de influencia, la revolución copernicana ofrece una oportunidad ideal para descubrir cómo y con qué consecuencias los conceptos pertenecientes a diversos campos del conocimiento se entremezclan íntimamente para formar un solo cañamazo. El propio Copérnico era un especialista en astronomía matemática que intentaba corregir las esotéricas técnicas empleadas hasta entonces para calcular las tablas de posiciones planetarias. Sin embargo, la dirección de su investigación se vio a menudo determinada por desarrollos absolutamente ajenos a la astronomía. Entre ellos cabe destacar los cambios acaecidos a lo

largo de la Edad Media en lo que respecta al análisis de la caída de las piedras; el nuevo despertar durante el Renacimiento de una antigua filosofía mística que consideraba el sol como la imagen de Dios y los viajes a través del Atlántico, que dilataron los horizontes geográficos del hombre renacentista. Con posterioridad a la aparición de la obra de Copérnico, aparecen lazos de unión todavía más robustos entre los diferentes campos del saber. A pesar de que el *De revolutionibus* consiste básicamente en un conjunto de fórmulas matemáticas, tablas y diagramas, sólo podía ser asimilado plenamente por hombres capaces de crear una nueva física, una nueva concepción del espacio y una nueva idea de la relación del hombre con Dios. Tales lazos interdisciplinarios creativos juegan diversos y variados papeles en el ámbito de la revolución copernicana. Es imposible efectuar análisis parciales del problema, tanto en lo que se refiere a objetivos como en lo relativo a métodos, para examinar la naturaleza de tales vínculos y sus repercusiones sobre el desarrollo del conocimiento humano.

Así pues, nuestra descripción de la revolución copernicana persigue descubrir la significación de su carácter pluralista, y probablemente sea ésta la más importante novedad que ofrece el presente texto. Sin embargo, el objetivo perseguido ha hecho necesaria una segunda innovación. Este libro viola constantemente las fronteras institucionalizadas que separan a los lectores de “ciencia” de los de “historia” o “filosofía”. A veces puede parecer tratarse de dos libros, uno de contenido científico y otro relacionado con la historia de las ideas.

Con todo, la combinación de ciencia e historia de las ideas es esencial para captar en su pleno significado la pluralidad estructural de la revolución copernicana. La astronomía fue el núcleo de dicha revolución. No es posible comprender su naturaleza, su cronología y sus orígenes sin un profundo conocimiento previo de los conceptos y datos que constituyeron los útiles de trabajo de los astrónomos planetarios. Las observaciones y teorías astronómicas son, pues, los componentes “científicos” esenciales que predominan en mis dos primeros capítulos y que no dejan de aparecer a lo largo de toda la obra. Sin embargo, dicho material no constituye en modo

alguno la totalidad del tema abordado. La astronomía planetaria nunca ha sido un campo de investigación absolutamente aislado, con sus propios e inmutables criterios de precisión, adecuación y verificación. Los astrónomos estaban preparados en otros campos del conocimiento científico, a la vez que se hallaban inmersos en el seno de diversos sistemas filosóficos y religiosos. Un buen número de sus creencias extra-astronómicas desempeñaron un papel fundamental, en primera instancia, difiriendo y, más tarde, modelando la revolución copernicana. Estas creencias de carácter no astronómico constituyen el objeto de la "historia intelectual" que desarrollo a lo largo de la presente obra y, a partir del segundo capítulo, corren paralelas al componente científico de la misma. Dado el propósito de este libro, ambos aspectos son idénticamente fundamentales.

Por otro lado, no estoy seguro de que ambos componentes sean realmente distintos. Si exceptuamos algunas raras monografías, la combinación de la historia de las ideas con la de la ciencia es infrecuente. A primera vista podría, pues, parecer incongruente. Sin embargo, no puede existir tal incongruencia intrínseca. Los conceptos científicos son ideas, y como tales forman parte de la historia intelectual. Raramente han sido tratados bajo este punto de vista, aunque sólo porque son muy pocos los historiadores con la formación técnica necesaria para trabajar sobre los materiales científicos originales. Por mi parte, estoy plenamente convencido de que las técnicas desarrolladas por los historiadores de las ideas pueden proporcionar un tipo de comprensión de los problemas que no podrá llegarle a la ciencia por ningún otro camino. Si bien hasta el momento ninguna obra de carácter elemental parece acudir en apoyo de dicha tesis, espero que el presente texto proporcione, como mínimo, una evidencia preliminar.

De hecho ya ha proporcionado alguna. Este libro tiene su origen en una serie de conferencias pronunciadas cada año y desde 1949 en uno de los cursos de formación científica general de la Universidad de Harvard, y la combinación de elementos técnicos con otros pertenecientes al campo de la historia de las ideas ha alcanzado pleno éxito. Dado que quienes han

seguido tales cursos no tenían intención de proseguir sus estudios en el campo de las ciencias naturales, los elementos técnicos y las teorías que se les han enseñado desempeñaban para ellos la función primordial de ejemplos antes que de informaciones con una utilidad intrínseca. Además, si bien los datos técnicos son esenciales, sólo comenzaron a adquirir su plena significación al ser enmarcados en su correspondiente cuadro histórico o filosófico, cuando arrojaron luz sobre el modo en que progresa la ciencia a lo largo de su camino, la naturaleza de la autoridad científica y la forma en que la ciencia afecta a la vida del hombre. Así pues, una vez colocado en este marco de referencia, el sistema copernicano, como cualquier otra teoría científica, adquiere relevancia y suscita el interés de un auditorio infinitamente más amplio que el constituido por los científicos o los estudiantes. Si bien mi intención al escribirlo fue ante todo proporcionar una lectura suplementaria a los alumnos de los cursos de Harvard, el presente libro, que no es uno de texto, también está dirigido al lector en general.

Muchos han sido los amigos y colegas que con sus valiosas advertencias y críticas han colaborado en la creación de este libro, pero ninguno de ellos dejó tan profunda huella como el embajador James B. Conant. Fue él quien me persuadió, mientras trabajaba a su lado, de que el estudio de la historia de la ciencia podía proporcionar un nuevo tipo de comprensión acerca de la estructura y función de la investigación científica. Sin mi propia revolución copernicana, que Conant engendró, el presente libro y mis otros ensayos sobre historia de la ciencia nunca habrían sido escritos.

Mr. Conant ha tenido a bien leer también el manuscrito de la presente obra, cuyos capítulos iniciales muestran varias huellas de sus productivas críticas. También debo expresar mi reconocimiento a Marie Boas, I. B. Cohen, M. P. Gilmore, Roger Hahn, G. J. Holton, E. C. Kemble, P. E. LeCorbellier, L. K. Nash y F. G. Watson por sus utilísimas sugerencias. Cada uno de ellos ha puesto su talento crítico al servicio de la lectura de, al menos, un capítulo de la presente obra; varios de ellos han leído el manuscrito completo de una primera versión, y todos me han salvado de errores y ambigüedades. La supervisión por parte de Mason Hammond y

Mortimer Chambers de mis ocasionales traducciones de textos latinos ha proporcionado a éstas una precisión de la que, de otro modo, carecerían. Arnolfo Ferruolo fue el primero en darme a conocer el *De sole* de Ficino y mostrarme que la actitud de Copérnico hacia el sol forma parte integral de la tradición renacentista, generalmente más manifiesta en la literatura y las artes que en el campo de las ciencias.

Las ilustraciones muestran la destreza, aunque difícilmente la paciencia, con la que Miss Polly Horan ha interpretado una y otra vez mis vagas indicaciones y las ha transformado en símbolos aclaratorios del contexto. J. D. Eider y el equipo directivo de la Harvard University Press me han prestado su constante y simpatizante guía en la ardua tarea de pasar a máquina un manuscrito que no se ajustaba ni a las reglas de una publicación científica ni a las de un texto histórico. El índice se debe a la inteligencia y a la paciente labor desplegadas por W. J. Charles.

La generosidad conjuntamente mostrada por la Harvard University y la John Simon Guggenheim Memorial Foundation me ha permitido disponer del año preciso para preparar la mayor parte del manuscrito al dispensarme de mis otras obligaciones académicas. También estoy en deuda de gratitud con la University of California, por la pequeña beca que permitió dar una última revisión a la obra y a las pruebas de imprenta.

Mi esposa ha sido una activa colaboradora a través de toda la gestación de la obra, aunque esta colaboración sea la menor de sus contribuciones a la misma. Los hijos del ingenio, en particular los de los demás, son los miembros más desmandados de todo hogar. Sin su continuada tolerancia y ascendiente, éste nunca habría logrado sobrevivir.

T. S. K.

Berkeley, California
Noviembre 1956

PRÓLOGO

En la parte de Europa situada más acá del telón de acero sigue prevaleciendo una educación de tipo literario. Una persona culta es aquella que domina varios idiomas y posee buenos conocimientos sobre arte y literatura europeos. Cuando hablo de buenos conocimientos, no quiero referirme con tal expresión a un dominio académico de los clásicos antiguos y modernos o a la posesión de un aguzado juicio crítico sobre cuestiones de estilo o forma. Me refiero, más bien, a un tipo de conocimiento que pueda ser empleado sin esfuerzo en el marco de una conversación en sociedad. Una educación basada y circunscrita a una tradición literaria posee ventajas claras: la distinción entre el 5 o el 10% de la población que ha recibido este tipo de educación y los demás se evidencia casi automáticamente al entablar conversación. Existe un cómodo sentido de solidaridad entre quienes disfrutan realmente con el arte, la literatura y la música. Para quienes se sienten obligados a participar en una discusión sobre tales temas, la capacidad de maniobra queda convenientemente delimitada por sus estudios generales; no representa demasiado esfuerzo mantener frescos en la memoria parte de los conocimientos tan penosamente adquiridos en la escuela. El precio para ser admitido en el seno de la tradición cultural de cualquier país europeo se paga de una vez por todas en los años de juventud. Teóricamente, este precio son ocho o nueve años en escuelas especiales cuyos *curricula* tienen por centro la lengua y literatura greco-romanas. He dicho teóricamente, pues en la práctica durante este último siglo el estudio de las lenguas modernas ha invadido el territorio anteriormente reservado al estudio del griego y, en buena parte, también el

consagrado al latín. No obstante, estos cambios no han alterado en lo fundamental las bases de la educación, pues el resultado sigue siendo largos años de trabajo escolar dedicados al estudio de las lenguas y literaturas europeas.

Desde hace al menos un siglo se han emprendido ataques intermitentes contra este tipo de educación. Las demandas para que las ciencias físicas adquieran mayor preponderancia en el *curriculum* han ido en aumento, por lo general asociadas a la petición de que se sustituyan las lenguas clásicas por las modernas. Raramente ha sido puesta en entredicho la función de las matemáticas, aceptándose de forma generalizada su inclusión a un nivel bastante completo, incluyendo el cálculo, en todos los planes de estudio preparatorios para la entrada en la universidad. Hace ya bastantes años se sugirió como bien perfilada alternativa al *curriculum* clásico un plan de estudios basado en la física, la química, las matemáticas y las lenguas modernas. Sin embargo, los defensores de la educación clásica siguen siendo fuertes y efectivos. Cuando menos, en Alemania el resultado del debate parece haber sido una serie de compromisos y concesiones mutuas, aunque por razón de la creciente importancia otorgada al estudio de los idiomas, no es exagerado afirmar que la que sigue dominando es la tradición literaria. Incluso en aquellas escuelas en que la mayor parte del tiempo está dedicado al estudio de las disciplinas científicas sería incorrecto decir que la tradición científica ha reemplazado a la literaria. Se podría decir más bien que, en mayor o menor grado, los estudiantes alemanes que ingresan en la universidad poseen una considerable información sobre las ciencias físicas. Pero lo que sigue siendo, como mínimo, una cuestión abierta es si tales conocimientos afectarán en lo sucesivo la actitud de quienes no prosigan una carrera de carácter científico. Parece preocupar muy poco o nada el que los no científicos puedan adquirir una mejor comprensión de la ciencia con el cambio de los métodos educativos. De hecho, no deberá extrañarnos que quienes hayan seguido una educación primariamente literaria sigan preguntándose si la ciencia puede interesar a quien no sea científico o ingeniero.

En los Estados Unidos la tradición literaria europea como base educativa desapareció, o mejor dicho, se transformó más allá de todo posible reconocimiento hace casi unos cien años. Pero no se ha visto sustituida por una educación cimentada en el estudio de las ciencias físicas, las matemáticas y los idiomas modernos. Algunos quizá se sientan inclinados a afirmar que no se ha producido sustitución alguna. Sea como fuere, lo cierto es que han existido repetidos intentos para proporcionar una amplia base a la vida cultural de la nación, amplia por cuanto incluye desde las ciencias físicas, biológicas y sociales hasta la tradición literaria anglosajona, pasando por una preocupación por las formas artísticas procedentes de varias civilizaciones. Si tales intentos, encaminados a producir el futuro ciudadano de una democracia que participe entusiásticamente en el desarrollo cultural de la nación, han creado en América un medio ambiente suficientemente alimenticio para la vida del espíritu, es un problema a discutir. Lo que no puede negarse es que, con contadas excepciones, los responsables de dichos intentos se han esforzado por conceder a la tradición científica una digna ubicación.

Sin embargo, la experiencia ha mostrado, tanto en los Estados Unidos como en las modernas escuelas europeas, cuán difícil es situar en pie de igualdad el estudio de la ciencia con el de materias como la literatura, el arte o la música. Un científico o un ingeniero pueden ser capaces de participar con plena entrega en una discusión sobre cuadros, libros u obras de teatro, pero es muy difícil mantener una conversación sobre física si la mayoría de los participantes no son científicos o ingenieros. (Y aunque debería ser el primero en negar que la facilidad de conversación sea un índice de educación, no hay duda de que lo escuchado en una conversación social puede ser un permisible método de diagnóstico.)

Es evidente que la ciencia y la literatura no dejan el mismo tipo de poso en la mente del estudiante. La química de los metales y el teatro de Shakespeare son dos tipos completamente diferentes de conocimiento por lo que se refiere a las necesidades de todo ser humano. Desde luego no es necesario tomar un ejemplo de las ciencias naturales; en la frase anterior puede sustituirse perfectamente “química de los metales” por “gramática

latina”. Expresado en términos simplísimos, la diferencia reside en el hecho de que el teatro de Shakespeare ha sido y sigue siendo el objeto de interminables debates en los que se ha criticado desde todo ángulo concebible el estilo y los personajes y constantemente han llegado hasta nosotros palabras de admiración o censura para los mismos. Por otro lado, nadie admira o desaprueba los metales o el comportamiento de sus sales.

No; para preparar al hombre educado para aceptar la tradición científica como compañera de la literaria, latente todavía incluso en la cultura de los Estados Unidos, es necesario algo más que estudiar la ciencia como un cuerpo organizado de conocimientos, algo más que una simple comprensión de las teorías científicas. Y ello en razón de que las dificultades para asimilar la ciencia dentro de la cultura occidental han ido creciendo con el paso de los siglos. Cuando en la época de Luis XIV se formaron las primeras academias científicas, los nuevos descubrimientos y teorías en el campo científico estaban al alcance de las gentes educadas con mucha mayor facilidad que hoy en día; dicha situación permanece hasta finalizadas las guerras napoleónicas. A comienzos del siglo XIX sir Humphrey Davy fascinaba a la sociedad londinense con sus lecciones de química, ilustradas con espectaculares experimentos. Cincuenta años más tarde, Michael Faraday deleitaba a jóvenes y viejos con sus charlas pronunciadas en el auditorio de la Royal Institution de Londres; sus conferencias sobre la química de la luz constituyen ejemplos clásicos de popularización científica. En nuestra propia época no han faltado intentos dentro de líneas similares; pero los obstáculos a vencer han crecido con los años. Conferencias y espectaculares experimentos han dejado de asombrar y satisfacer a sofisticadas audiencias como antaño; la moderna ingeniería los supera casi a diario. Las novedades científicas que aparecen en un año son demasiado numerosas y alambicadas para constituir un tema de conversación entre los profanos. Los adelantos se efectúan con tanta rapidez y en tan variados frentes que el profano se siente aturdido; además, para comprender el significado de una innovación científica es necesario conocer a fondo el estado de la ciencia en cuestión antes de dicha innovación. Incluso para aquellos que dominan una rama de la ciencia es difícil

comprender hacia dónde se encaminan los trabajos en un campo ajeno al suyo. Por ejemplo, los físicos difícilmente están en condiciones de leer comunicaciones, incluso esquemáticas, escritas por un geneticista para otros geneticistas, y viceversa. Para el amplio grupo de gente con instrucción científica y técnica que desea estar al día en los progresos de la ciencia en general hay algunas excelentes publicaciones periódicas y, de vez en cuando, aparecen libros de gran utilidad al respecto. No obstante, tengo serias dudas de que este esfuerzo por popularizar la ciencia alcance a quienes no se hallan directamente vinculados con las ciencias físicas o biológicas o con sus aplicaciones. Además, algunos intentos de popularización son tan superficiales y sensacionalistas que carecen de todo valor como material adecuado para proporcionar una base para la comprensión de la ciencia al lego en la materia.

En los últimos diez o quince años se ha ido incrementando en las escuelas norteamericanas la preocupación por el lugar destinado en el *curriculum* a las ciencias físicas y biológicas. Los clásicos cursos introductorios de física, química y biología han sido considerados por muchos como escasamente satisfactorios para los estudiantes que no pretenden seguir un posterior estudio intensivo de la ciencia, la ingeniería o la medicina. Varias son las propuestas lanzadas y diversos los experimentos puestos en marcha para encontrar nuevos tipos de cursos científicos que puedan formar parte de un programa general de educación o de un programa de humanidades. En particular, se ha recomendado un mayor énfasis en el estudio de la historia de la ciencia, propuesta a la que me he adherido con entusiasmo. En el momento presente, la experiencia efectuada en el Harvard College sobre un determinado tipo de enfoque histórico ha incrementado mi convicción en las posibilidades inherentes al estudio de la historia de la ciencia, particularmente si se combina con un análisis de los varios métodos por los que ésta ha progresado. Aun reconociendo el valor educativo de una visión de conjunto sobre la historia de la ciencia en los últimos 300 años, creo que puede obtenerse un mayor beneficio a través de un estudio intensivo de ciertos episodios particulares en el desarrollo de la física, la química o la biología. Esta convicción se ha materializado a través

de una serie de folletos titulada “Harvard Case Histories in Experimental Science”.

Los casos considerados en dicha serie están relativamente poco restringidos tanto desde el punto de vista cronológico como del problema abordado. El objetivo de los mismos ha sido desarrollar en el estudiante una cierta comprensión de la interrelación entre teoría y experimento y de la complicada cadena de razonamientos que conecta la verificación de una hipótesis con los resultados experimentales obtenidos. Con tales objetivos, la base de cada uno de los casos la constituye un texto científico original y se invita al lector, mediante una serie de comentarios introducidos por los editores, a que siga hasta donde le sea posible la línea de razonamiento del propio investigador. Se deja al arbitrio de los profesores que empleen dichos folletos la posibilidad de insertar el estudio de un caso particular dentro de un amplio marco de referencia que contemple el avance general de la ciencia.

Los “Harvard Case Histories” están muy limitados en cuanto a alcance y demasiado centrados en detalles experimentales y análisis de métodos para el lector en general. Por otro lado, aunque los episodios escogidos tienen todos su importancia en la historia de la física, la química o la biología, su verdadero significado no es en modo alguno evidente para el no iniciado. El lector pronto se dará cuenta de que el presente volumen no adolece de tales defectos. Todo el mundo conoce el impacto ejercido sobre la cultura occidental por el paso desde un universo aristotélico centrado en la tierra al universo copernicano. El profesor Kuhn se enfrenta, no con un caso aislado en la historia de la ciencia, sino con una serie de sucesos influenciados por, y que a su vez influenciaron, la actitud de hombres instruidos cuyos intereses estaban fuera del campo astronómico propiamente dicho. No se ha impuesto la relativamente fácil tarea de relatar la historia del desarrollo de la astronomía durante un período revolucionario. Antes bien, ha conseguido presentar con pleno éxito un análisis de la relación entre teoría, observación y creencia, enfrentándose con intrepidez a cuestiones tan embarazosas como discernir por qué brillantes, fervientes y auténticos estudiosos de la naturaleza demoraron por

tanto tiempo su beneplácito a la ordenación heliocéntrica de los planetas. Este libro no es una relación superficial del trabajo de los científicos. Por el contrario, se trata de una completa exposición de una de las fases del trabajo científico y de la que el lector atento podrá extraer interesantes conclusiones sobre la curiosa interacción entre hipótesis y experimento (u observación astronómica) que es la esencia de la ciencia moderna, aspecto ampliamente desconocido por los no científicos.

No es mi propósito intentar comprimir en píldoras dentro del presente prólogo el contenido de las enseñanzas sobre el proceso científico que pueden derivarse de la lectura del trabajo del profesor Kuhn. Sólo deseo patentizar mi convicción de que el camino de aproximación a la ciencia presentado en este libro es el adecuado para que la tradición científica llegue a ocupar el lugar que se merece frente a la tradición literaria en el ámbito de la cultura de los Estados Unidos. La ciencia ha sido una empresa en la que han intervenido por igual errores y confusiones junto con brillantes triunfos; una empresa que ha sido llevada adelante por seres humanos en extremo falibles y a menudo altamente impresionables; una parte fundamental de la actividad creativa del mundo occidental que nos ha legado arte, literatura y música. La evolución de la concepción humana de la estructura del universo pergeñada en las páginas que siguen afecta en mayor o menor grado la actitud mental de toda persona educada de nuestra época; el problema en cuestión tiene una profunda significación por sí mismo. Pero, por encima y al margen de la importancia de la revolución astronómica, merece atención la forma concreta en que lo aborda el profesor Kuhn, pues, o mucho me equivoco, o indica el camino a recorrer para que la ciencia sea asimilada por la cultura de nuestros días.

JAMES B. CONANT

Capítulo 1

EL ANTIGUO UNIVERSO DE LAS DOS ESFERAS

COPÉRNICO Y EL ESPÍRITU MODERNO

La revolución copernicana fue una revolución en el campo de las ideas, una transformación del concepto del universo que tenía el hombre hasta aquel momento y de su propia relación con el mismo. Se ha dicho una y mil veces que este episodio de la historia del pensamiento renacentista representó el punto álgido de un cambio de perspectiva irreversible en el desarrollo intelectual del hombre occidental. Sin embargo, dicha revolución tuvo lugar sobre las más oscuras y recónditas minucias de la investigación astronómica. ¿Cómo pudo adquirir tan enorme significación? ¿Qué significado debe adjudicarse a la expresión "revolución copernicana"?

En 1543 Nicolás Copérnico se propuso incrementar la precisión y sencillez de la teoría astronómica vigente transfiriendo al sol muchas de las funciones que hasta entonces se atribuían a la tierra. Con anterioridad a su propuesta, la tierra había sido el centro fijo con respecto al cual los astrónomos calculaban los movimientos de planetas y estrellas. Un siglo más tarde, el sol, al menos en lo que hace referencia a la astronomía, había reemplazado a la tierra como centro de los movimientos planetarios, y ésta había perdido su privilegiado estatuto astronómico para convertirse en un planeta más de entre los que se mueven alrededor del sol. Una gran parte de los resultados más importantes alcanzados por la astronomía moderna

reposa sobre dicha transposición. Así pues y ante todo, la revolución copernicana significa una reforma en los conceptos fundamentales de la astronomía.

Sin embargo, esa revolución no se limita a la reforma astronómica. La publicación en 1543 de su *De revolutionibus* vino inmediatamente seguida por otros cambios radicales en la forma de comprender la naturaleza por parte del hombre. Gran parte de estas innovaciones, que culminaron un siglo y medio más tarde en el concepto newtoniano del universo, eran consecuencias imprevisibles de la teoría astronómica de Copérnico. Éste propuso el movimiento terrestre en un esfuerzo por perfeccionar las técnicas usadas entonces para predecir las posiciones astronómicas de los cuerpos celestes. Pero al hacerlo así planteó a otras disciplinas científicas nuevos problemas, y, hasta que se resolvieron éstos, el concepto del universo propuesto por el astrónomo fue incompatible con el de los otros científicos. La reconciliación de la astronomía copernicana con estas otras ciencias durante el siglo XVII fue una causa importante de la fermentación intelectual generalizada que en la actualidad designamos con el nombre de revolución científica. Gracias a tal revolución la ciencia pasaría a desempeñar el nuevo y gran papel que la ha caracterizado en la posterior evolución del pensamiento y sociedad occidentales.

Ni siquiera las consecuencias en el plano científico agotan el significado de la revolución copernicana. Copérnico vivió y trabajó en un período caracterizado por los rápidos cambios de orden político, económico e intelectual que prepararían las bases de la moderna civilización europea y americana. Su teoría planetaria y la idea, a ella asociada, de un universo heliocéntrico fueron instrumentos que impulsaron la transición desde la sociedad medieval a la sociedad occidental moderna, pues parecían afectar a las relaciones del hombre con el universo y con Dios. Aunque inicialmente se presenta como una revisión estrictamente técnica y altamente matematizada de la astronomía clásica, la teoría de Copérnico se convirtió en un foco de las apasionadas controversias religiosas, filosóficas y sociales que, durante los dos siglos subsiguientes al descubrimiento de América, establecerían el curso del espíritu moderno. Los hombres que

creían que su habitáculo terrestre tan sólo era un planeta que circulaba ciegamente a través de una infinidad de estrellas valoraban su ubicación en el marco cósmico de forma bastante diferente a como lo hacían sus predecesores, para quienes la tierra era el centro único y focal de la creación divina. En consecuencia, la revolución copernicana también desempeñó un papel en la transformación de los valores que regían la sociedad occidental.

Este libro es la historia de la revolución copernicana en cada uno de los tres ámbitos estrechamente interrelacionados indicados hasta aquí, astronómico, científico y filosófico. El tema que desarrollaremos más ampliamente será, desde luego, el de la revolución copernicana considerada como un episodio del desarrollo de la astronomía planetaria. A lo largo de los dos primeros capítulos pondremos de manifiesto todo cuanto podía observarse a simple vista en los cielos, así como el modo en que reaccionaron los primeros observadores ante sus descubrimientos, interesándonos principalmente por la astronomía y los astrónomos. Sin embargo, una vez hayamos examinado las principales teorías astronómicas de la antigüedad, cambiará nuestro enfoque. Analizando los puntos fuertes de la antigua tradición astronómica y examinando las condiciones que se requerían para una ruptura radical con la misma, iremos descubriendo gradualmente cuán difícil es restringir el alcance de un concepto científico a una sola rama de las ciencias o, incluso, al conjunto de éstas. Por dicha razón, a lo largo de los capítulos 3 y 4 nuestro interés no se centrará tanto en la propia astronomía como en el medio ambiente intelectual y, de forma más sucinta, en el ámbito social y económico en cuyo seno se practicaban los estudios astronómicos. Dichos capítulos tratarán básicamente de las implicaciones extra-astronómicas —en los campos de la ciencia, la religión y la vida cotidiana— derivadas de un esquema conceptual astronómico venerado durante siglos; nos mostrarán cómo un cambio en los conceptos de la astronomía matemática podía tener consecuencias revolucionarias. Finalmente, en los tres últimos capítulos, cuando volvamos a la obra de Copérnico, a la acogida que le fue dispensada y a su contribución a una nueva concepción científica del universo, trataremos todas las cuestiones anteriormente apuntadas. Sólo la lucha que impuso el concepto de una tierra

planetaria como premisa del pensamiento occidental puede mostrar correctamente al espíritu moderno la plena significación de la revolución copernicana.

En razón de sus consecuencias técnicas e históricas, la revolución copernicana se sitúa entre los episodios más fascinantes de toda la historia de las ciencias. Pero además tiene un significado adicional que trasciende su objeto específico: ilustra un proceso que necesitamos comprender de forma perentoria en nuestros días. La civilización occidental contemporánea depende, tanto en su filosofía cotidiana como para obtener su pan y su sal, de los conceptos científicos en un grado mucho más elevado que ninguna otra civilización precedente. Sin embargo, es bastante improbable que las teorías científicas actualmente aceptadas y que tan importante lugar ocupan dentro de nuestra vida cotidiana, se nos revelen como definitivas. La concepción astronómica de un universo en el que las estrellas, entre las que cabe incluir a nuestro sol, se hallen dispersadas aquí y allá en un espacio infinito empezó a desarrollarse hace poco menos de cuatro siglos y ya está superada. Antes de que Copérnico y sus sucesores desarrollaran dicha teoría, ya habían sido empleadas otras varias nociones sobre la estructura del universo para explicar los fenómenos que el hombre observaba en los cielos. Estas teorías astronómicas primitivas son radicalmente diferentes de las que aceptamos en la actualidad, pero la mayor parte de las mismas recibieron en su época una adhesión tan resuelta como la que hoy en día adjudicamos a las nuestras. Además, se las consideraba acertadas por idénticas razones; es decir, porque aportaban respuestas plausibles a las cuestiones que parecían importantes. Son otras muchas las ciencias que nos ofrecen ejemplos semejantes en lo que respecta a la transitoriedad de las reverenciadas creencias científicas; de hecho, los conceptos básicos de la astronomía han gozado de una estabilidad mucho más acusada que los de la mayor parte de las ciencias.

La mutabilidad de sus conceptos fundamentales no es razón suficiente para rechazar la ciencia. Cada nueva teoría científica conserva un sólido núcleo de conocimientos formado por las teorías precedentes, al cual añade otros nuevos. La ciencia progresa reemplazándolas antiguas teorías por

otras nuevas, pero un siglo tan dominado por la ciencia como el que nos ha tocado vivir necesita una perspectiva desde la que examinar las creencias científicas que tan a menudo da por supuestas, y la historia es una de las más importantes vías que pueden proporcionárnosla. Si podemos descubrir los orígenes de algunos conceptos científicos modernos y el modo en que han reemplazado a los correspondientes de épocas pretéritas, quizá consigamos valorar de forma inteligente cuáles son sus probabilidades de supervivencia. La presente obra se ocupa básicamente de los conceptos astronómicos, pero existe gran similitud entre éstos y los propios de otras ramas del conocimiento científico. En consecuencia, analizando mi desarrollo podremos comprender mejor —al menos, así lo esperamos— las teorías científicas en general. Preguntas tales como ¿qué es una teoría científica?, ¿sobre qué debe fundamentarse para que merezca nuestros respetos?, ¿cuál es su función y su uso?, ¿cuáles son sus probabilidades de perdurar? no pueden ser respondidas por el análisis histórico, pero éste puede iluminarlas y darles sentido.

Puesto que en muchos de sus aspectos la teoría copernicana es una típica teoría científica, su historia puede ilustrarnos algunos de los procesos mediante los cuales los conceptos científicos evolucionan y reemplazan a sus predecesores. Sin embargo, en lo que respecta a sus consecuencias extra-científicas, la teoría copernicana no puede ser considerada como típica, pues pocas son las teorías científicas que han desempeñado un papel tan importante en el marco del pensamiento no científico. Tampoco se trata de un caso único. En el siglo XIX, la teoría de la evolución de Darwin despertó las mismas cuestiones extra-científicas. En nuestra época, la teoría de la relatividad de Einstein y las teorías psicoanalíticas de Freud han levantado controversias de las que quizá surjan nuevas y radicales orientaciones del pensamiento occidental. El propio Freud hizo hincapié en el paralelismo existente entre los efectos del descubrimiento de Copérnico, según el cual la tierra no era más que un planeta, y su propio descubrimiento, que revela la importancia del papel del inconsciente en el comportamiento humano. Hayamos o no estudiado sus teorías, somos los herederos intelectuales de hombres como Copérnico y Darwin. Los

procesos fundamentales de nuestro pensamiento se han visto transformados por su causa, del mismo modo que el pensamiento de nuestros hijos o nietos se habrá transformado gracias a la obra de Freud y Einstein. Necesitamos algo más que una simple comprensión de la progresión interna de la ciencia. Debemos también comprender cómo la resolución dada por un científico a un problema aparentemente menor, estrictamente técnico, puede en ciertos casos transformar fundamentalmente la actitud de los hombres frente a los principales problemas de su vida cotidiana.

El cielo en las cosmologías primitivas

La mayor parte de este libro está consagrada a estudiar el impacto de las observaciones y teorías astronómicas sobre el pensamiento cosmológico antiguo y el de los comienzos de la época moderna, es decir, sobre el conjunto de conceptos que tenía el hombre acerca de la estructura del universo. En la actualidad se admite sin ningún género de dudas que la astronomía afecta a la cosmología. Si deseamos conocer la configuración del universo o la relación existente entre la tierra y el sol y entre el sol y las estrellas, preguntaremos al astrónomo, o quizás al físico; uno y otro han reunido detalladas observaciones cuantitativas del cielo y de la tierra y su conocimiento del universo está garantizado por la precisión con que predicen su comportamiento. Nuestro común concepto del universo, nuestra cosmología popular, es fruto de sus laboriosas investigaciones, pero esta estrecha vinculación entre la astronomía y la cosmología se halla limitada tanto en el tiempo como en el espacio. Todas las civilizaciones y culturas que conocemos han dado su respuesta al problema consistente en dilucidar cuál es la estructura del universo, pero sólo las civilizaciones occidentales que descienden de la Grecia helénica han prestado singular atención al aspecto de los cielos para obtener dicha respuesta. La tendencia a construir cosmologías es mucho más antigua y primitiva que el impulso de efectuar observaciones sistemáticas del cielo. Por otro lado, la forma más antigua de explicación cosmológica es en extremo interesante por cuanto arroja luz

sobre una serie de rasgos que se han visto oscurecidos en las cosmologías más técnicas y abstractas con que estamos familiarizados en la actualidad.

Las concepciones primitivas del universo estaban determinadas ante todo por los eventos terrestres, es decir, por los sucesos que repercutían de forma más inmediata sobre los constructores de tales sistemas. En dichas cosmologías, el cielo, apenas esbozado como tal, se limitaba a desempeñar el papel de envoltura de nuestro planeta, y se le consideraba poblado por una serie de personajes míticos que se ocupaban de darle movimiento y cuyos arbitrarios poderes crecían en función directa de su distancia al medio ambiente contiguo a la tierra. En una de las principales formas de la cosmología egipcia, la tierra era una especie de plato alargado. El Nilo corría paralelamente a la dimensión mayor de dicha bandeja, en cuyo fondo se hallaba el lecho de aluviones en el que se encontraba confinada la antigua civilización egipcia, mientras que sus bordes curvados y ondulados constituían las montañas que delimitaban el mundo terrestre. Por encima de dicha tierra-bandeja se hallaba el dios aire, que sostenía una bandeja invertida en forma de bóveda, el cielo. Por su lado, la bandeja terrestre era sostenida por otro dios, el agua, quien a su vez reposaba sobre una tercera bandeja que delimitaba simétricamente al universo desde abajo.

Es de todo punto evidente que los principales rasgos de la estructura de este universo les habían sido sugeridos a los egipcios por el mundo que conocían: vivían en un país semejante a una bandeja y limitado por el agua en la única dirección en que lo habían explorado; el cielo, de día o de noche, semejaba una gran bóveda; en ausencia de observaciones relevantes, se imponía suponer un límite inferior del universo, simétrico a la bóveda celeste. Por otro lado, los egipcios no ignoraban los aspectos astronómicos, si bien eran tratados con menos precisión y más mito. El sol era Ra, el principal dios egipcio; Ra poseía dos embarcaciones, una para su viaje diurno a través de los aires y la otra para su travesía nocturna sobre las aguas. Las estrellas estaban pintadas o claveteadas sobre la bóveda celeste y se movían como dioses menores; en algunas versiones de la cosmología egipcia, renacían cada noche. En ciertos casos se llevaban a cabo observaciones más precisas del cielo, como por ejemplo las referentes a las

estrellas circumpolares (estrellas que nunca descienden por debajo del horizonte), que habían sido designadas por los egipcios como “aquellas que no conocen la fatiga” o “aquellas que no conocen la destrucción”. A partir de tales observaciones, se identificaba a los cielos del norte con una región en la que no podía existir la muerte, el país donde se gozaba de una vida eterna feliz. Sin embargo, las observaciones del cielo eran raras entre los egipcios.

Se encuentran fragmentos de una cosmología comparable a la de los egipcios en todas las viejas civilizaciones, como por ejemplo en las de la India y Babilonia, sobre las que disponemos de documentación concreta. El antropólogo moderno ha encontrado otras cosmologías rudimentarias entre las sociedades primitivas contemporáneas que han sido objeto de su investigación. Aparentemente, todos estos bosquejos de una estructura del universo responden a una necesidad psicológica profunda; a saber, conforman el marco sobre el que se desarrollan las actividades cotidianas del hombre y de sus dioses. Al explicar la relación física existente entre el habitat del hombre y el resto de la naturaleza, dichos esquemas le integran en el universo y le hacen sentirse como en su propia casa. El hombre no deja pasar nunca demasiado tiempo sin inventar una cosmología, puesto que ésta siempre le impregna de un determinado punto de vista sobre el mundo y da un significado a cada uno de sus actos, sean físicos o espirituales.

Aunque las necesidades psicológicas satisfechas por una cosmología parecen ser relativamente uniformes, las cosmologías susceptibles de alimentar dichas necesidades han variado enormemente según las diversas sociedades o civilizaciones. Ninguna de las cosmologías primitivas a las que nos hemos referido en líneas precedentes satisfaría nuestra exigencia actual de una visión general del mundo, pues somos miembros de una civilización que ha establecido nuevos criterios adicionales a los que debe responder toda cosmología que pretenda ser aceptada en su seno. Por ejemplo, no daremos crédito alguno a una cosmología que haga intervenir a los dioses para explicar el comportamiento cotidiano del mundo físico. En los últimos siglos hemos insistido en la aceptación de explicaciones mecanicistas y, lo que aún es más importante, para que una cosmología nos

parezca satisfactoria exigimos que sea capaz de dar explicación a los numerosos detalles observados en los fenómenos naturales. Las cosmologías primitivas no son más que bosquejos esquemáticos frente a los que toma carta de identidad el drama de la naturaleza, y pocos son los elementos de la obra que encuentran un lugar en el marco de la cosmología. Ra, el dios sol, atraviesa cada día el cielo sobre su embarcación, pero no hay nada en la cosmología egipcia, que nos explique ni la regularidad de sus viajes ni la variación estacional de la ruta seguida por su bote. Tan sólo nuestra civilización occidental ha considerado que una de las funciones de la cosmología era explicar tales hechos. Ninguna otra civilización, antigua o moderna, ha planteado semejante exigencia.

La necesidad de que una cosmología ofrezca *a un mismo tiempo* una visión del mundo psicológicamente satisfactoria *y* una explicación de los fenómenos observados, tales como, por ejemplo, la diaria variación de la posición por la que emerge el sol, ha estimulado de forma considerable el poder del pensamiento cosmológico, canalizando el deseo universal de un mundo tranquilizador a través de un esfuerzo sin precedentes por descubrir explicaciones científicas al mismo. Un buen número de las más características realizaciones de la civilización occidental se debe a dicha combinación de exigencias que plantea al pensamiento cosmológico. Sin embargo, no siempre ha podido congeniarse de forma satisfactoria tal combinación, y el hombre moderno se ha visto forzado a delegar la elaboración de cosmologías a los especialistas, principalmente a los astrónomos, quienes conocen la multitud de observaciones precisas de las que debe dar cuenta toda cosmología moderna para que sea aceptada. Y puesto que la observación es un arma de doble filo que puede confirmar una cosmología o entrar en conflicto con ella, las consecuencias de una tal delegación pueden ser devastadoras. En determinadas ocasiones, el astrónomo destruye, por razones estrictamente inherentes a su especialidad, una visión del mundo que tenía pleno sentido para todos los miembros de una civilización, fueran o no especialistas en cosmología.

Algo así fue lo que sucedió con la revolución copernicana. Para comprenderla en su pleno significado debemos intentar convertirnos

nosotros mismos en un poco especialistas. En particular, debemos conocer las principales observaciones, todas ellas posibles a simple vista, sobre las que reposan las dos principales cosmologías científicas occidentales, la ptolemaica y la copernicana. Para tal fin no nos bastará con una simple visión panorámica del cielo. En una noche clara, el cielo habla ante todo a la imaginación poética y no a la imaginación científica. Para quien contempla el cielo nocturno las estrellas semejan, tal como se lo parecieron a Shakespeare, "candelas de la noche" y la Vía láctea es, según la imagen de Milton, como "un amplio camino pavimentado de estrellas en el que centellea un polvo dorado". Pero tales descripciones son equivalentes a las de las primitivas cosmologías y no aportan ninguna evidencia relevante a las preguntas que se plantea el astrónomo. Preguntas tales como ¿a qué distancia se encuentran la Vía láctea, el sol y Júpiter?, ¿cómo se mueven estos puntos luminosos? o ¿acaso la composición de la luna es comparable a la de la tierra, a la del sol, o a la de las estrellas? exigen observaciones sistemáticas, detalladas y cuantitativas acumuladas durante un largo período de tiempo.

Este capítulo trata, pues, de las observaciones del sol y de las estrellas y del papel que desempeñaron tales observaciones en la elaboración de las primeras cosmologías científicas de la antigua Grecia. El capítulo siguiente completa la lista de las observaciones del cielo efectuadas sin ayuda de instrumental a través de la descripción de los planetas, los cuerpos celestes que plantearon los problemas técnicos que desembocarían en la revolución copernicana.

EL MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL

A finales del segundo milenio antes de nuestra era, y quizás en época muy anterior, babilonios y egipcios ya habían efectuado observaciones sistemáticas del movimiento solar. A este efecto, concibieron un reloj de sol primitivo consistente en una varilla graduada, el gnomon, que se levanta verticalmente sobre un terreno liso y horizontal. Puesto que la posición

aparente del sol, la extremidad del gnomon y la extremidad de su sombra están alineados durante todos y cada uno de los instantes de un día despejado, la medición de la longitud y de la dirección de la sombra en un instante dado determinan completamente la dirección del sol. Cuando la sombra es corta, el sol está alto en el cielo; cuando la sombra está orientada, digamos hacia el este, el sol está situado en el oeste. Así pues, repetidas observaciones de la sombra del gnomon pueden sistematizar y cuantificar un vasto número de conocimientos comunes, aunque vagos, sobre la variación cotidiana y anual de la posición del sol. En la antigüedad tales observaciones convirtieron al sol en un reloj y un calendario, aplicaciones ambas que constituyeron un motivo de primer orden para continuar y perfeccionar las correspondientes técnicas observacionales.

La longitud y la dirección de la sombra de un gnomon varían simultáneamente de forma lenta y continuada a lo largo del día. La sombra alcanza su mayor longitud cuando nace y se pone el sol, orientándose en tales momentos según direcciones sensiblemente opuestas. Durante las restantes horas del día, la sombra se desplaza de forma gradual barriendo una figura simétrica en forma de abanico que, en la mayor parte de las ubicaciones accesibles a los observadores de la antigüedad, es sensiblemente parecida a alguna de las que se muestran en la figura 1. Tal como podemos observar en dicha figura, la forma del abanico cambia todos los días, pero siempre guarda una misma característica: en el momento del día en que la sombra del gnomon es más corta, siempre está orientada en la misma dirección. Esta simple regularidad proporciona dos marcos de referencia fundamentales para todas las restantes mediciones astronómicas. La dirección permanente tomada por la sombra más corta en todos y cada uno de los días define el norte y, en consecuencia, nos determina los restantes puntos cardinales. El instante en que la sombra tiene menor longitud define un punto de referencia en el tiempo, el mediodía del lugar, y el intervalo de tiempo que separa en un lugar dado dos mediodías consecutivos define una unidad de tiempo fundamental, el día solar. Durante el primer milenio anterior a nuestra era, babilonios, egipcios, griegos y romanos se sirvieron de instrumentos primitivos para medir el

tiempo, en particular de relojes de agua, y tomaron como objetivo subdividir el día solar en intervalos más pequeños, de los que derivan nuestras unidades de tiempo modernas, la hora, el minuto y el segundo.[*]

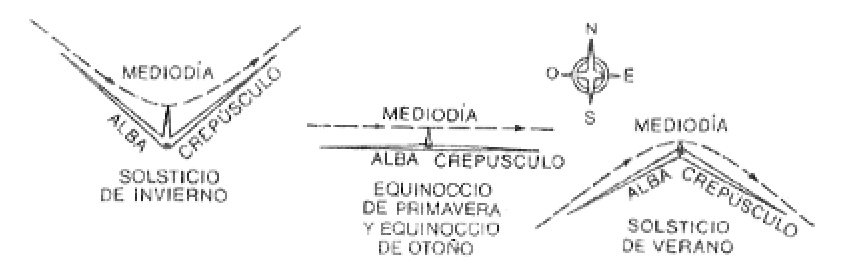


FIGURA 1. — Movimiento de la sombra del gnomon en las latitudes boreales medias durante las diversas estaciones del año. A la salida y a la puesta del sol, la sombra se alarga instantáneamente hasta el infinito y su extremo “se junta” con la línea representada en trazo discontinuo. Entre el alba y el crepúsculo, la extremidad de la sombra se mueve lentamente a lo largo de dicha línea; en el mediodía, la sombra siempre está dirigida hacia el norte exacto.

Los puntos cardinales y las unidades de tiempo definidas por el movimiento diario del sol proporcionan una base para describir las variaciones que se dan en dicho movimiento de un día a otro. El sol sale siempre por alguna parte situada en el este y se pone por el oeste, pero la posición del sol naciente, la longitud de la sombra del gnomon en el instante del mediodía y el número de horas de luz varían de un día a otro con las estaciones (figura 2). El solsticio de invierno (22 de diciembre según el calendario moderno) es el día en que el sol sale y se pone más al sur de los puntos cardinales este y oeste respectivamente. Dicho día es el más corto del año, y cuando el sol alcanza su cénit la sombra del gnomon es más larga que la de cualquier otro día. Después del solsticio de invierno, los puntos por los que emerge y se pone el sol se desplazan paulatinamente sobre el horizonte hacia el norte, mientras que la longitud de las sombras en el mediodía decrecen. En el equinoccio de primavera (21 de marzo), el sol sale y se pone exactamente sobre el este y el oeste cardinales; día y noche tienen entonces idéntica duración. A medida que transcurren los días, los puntos por los que emerge y se pone el sol continúan desplazándose hacia el norte, y la duración del día aumenta de forma paulatina hasta alcanzarse el solsticio de verano (22 de junio), el día en que el sol sale y se pone más hacia el norte de los respectivos puntos cardinales. Ésta es la época del año

en que los días son más largos y en que es más corta la sombra que proyecta el gnomon al mediodía. Después del solsticio de verano, el punto de salida del sol se desplaza nuevamente hacia el sur y crece la longitud de las noches. Llegando al equinoccio de otoño (23 de septiembre), el sol sale y se pone de nuevo prácticamente sobre el este y el oeste, para continuar más tarde hacia el sur hasta que alcanza otra vez el solsticio de invierno.

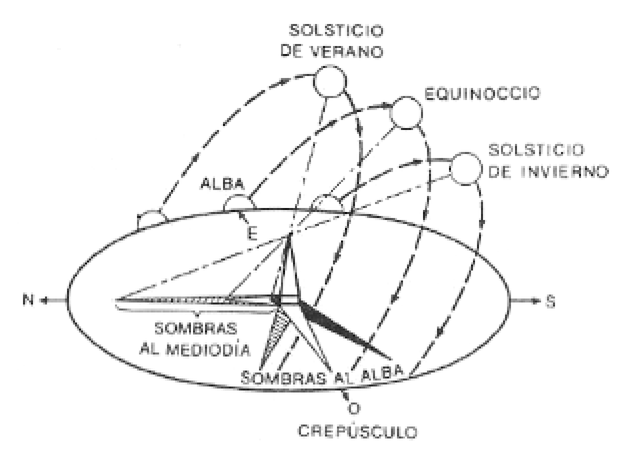


FIGURA 2. — Relación entre la posición del sol en su salida, su elevación a mediodía y la variación estacional de la sombra del gnomon.

Tal como indican los nombres modernos de los solsticios y los equinoccios, las variaciones de la posición del sol al levantarse y ponerse sobre la línea del horizonte corresponden al ciclo de las estaciones. Ésta es la razón que impulsó a la mayor parte de los pueblos de la antigüedad a creer que el sol controlaba las estaciones. Veneraban al sol como a un dios y, a un mismo tiempo, le consideraban como el guardián del calendario, indicador *defacto* del cielo seguido por las estaciones, del que dependían sus trabajos agrícolas. Los vestigios prehistóricos, tales como la misteriosa disposición de las piedras gigantes de Stonehenge, Inglaterra, dan testimonio de la fuerza y de la antigüedad de este doble interés hacia las funciones del sol. Stonehenge era un importante templo laboriosamente construido con enormes piedras, el peso de algunas de las cuales es superior a las treinta toneladas, por un pueblo que vivía en los inicios de la Edad de Piedra. Parece sumamente probable que se tratara también de un observatorio rudimentario, pues las piedras estaban dispuestas de tal forma

que un observador colocado en el centro del conjunto formado por las mismas podía ver levantarse el sol, el día del solsticio de verano, por encima de una determinada piedra denominada “Friar’s Heel” (el talón del monje).

La longitud del ciclo de las estaciones, es decir, el intervalo de tiempo que separa dos equinoccios de primavera consecutivos, define el año, unidad básica del calendario, del mismo modo que el movimiento cotidiano del sol define el día. El año es una unidad mucho más difícil de medir que el día, razón por la cual la necesidad de establecer calendarios a largo término ha planteado a los astrónomos un problema difícil y continuado cuyo relieve a lo largo del siglo XVI desempeñó un papel de primer orden en la revolución copernicana. Los primeros calendarios solares de la antigüedad estaban basados en un año de 360 días, número redondeado que encajaba cómodamente en el sistema numérico sexagesimal de los sumerios. Pero el ciclo de las estaciones tiene más de 360 días, con lo cual el día de año nuevo de estos primeros calendarios se desplazaba gradualmente a lo largo de todo el ciclo estacional, desde el invierno al otoño, al verano y a la primavera. Con el tiempo, tales calendarios se hicieron prácticamente inutilizables, pues, a medida que iban transcurriendo los años, importantes eventos estacionales, tales como la crecida periódica del Nilo en Egipto, se producían en fechas cada vez más y más tardías. Para acoplar el calendario solar con las estaciones, los egipcios decidieron añadir cinco días suplementarios al calendario primitivo, lapso de tiempo que fue considerado festivo.

Sea como fuere, el número de días que abarca el ciclo de las estaciones no es un número entero. El año de 365 días sigue quedando corto, por cuya razón, una vez pasados cuarenta años, el calendario egipcio se vio desajustado en diez días con relación a las estaciones. Cuando Julio César reformó el calendario, para lo cual contó con la asistencia técnica de astrónomos egipcios, tuvo en cuenta cuanto acabamos de indicar y estableció un nuevo calendario sobre la base de un año con 365 1/4 días; tres años de 365 días venían seguidos por un cuarto año de 366 días. Dicho calendario, el calendario juliano, fue utilizado en toda Europa desde su

introducción en el año 45 antes de nuestra era hasta después de la muerte de Copérnico. Pero el año marcado por las estaciones es en realidad 11 minutos y 14 segundos más corto, de tal forma que durante la vida de Copérnico la fecha del equinoccio de primavera fue atrasada del 21 al 11 de marzo. La necesidad de llevar a cabo una reforma en el calendario (véanse los capítulos 4 y 5) constituyó una importante causa motriz de la propia reforma de la astronomía, y el mundo occidental sólo recibió su calendario moderno treinta y nueve años después de la publicación del *De revolutionibus*. En el nuevo calendario, impuesto a la mayor parte de la Europa cristiana por el papa Gregorio XIII en 1582, el año bisiesto es suprimido tres veces cada cuatro siglos. El año 1600 fue un año bisiesto, tal como lo será el año 2000; sin embargo, 1700, 1800 y 1900, todos ellos bisiestos según el calendario juliano, de acuerdo con el nuevo calendario gregoriano sólo tuvieron 365 días y, por idéntica razón, el año 2100 será nuevamente un año normal de 365 días.

Todas las observaciones del sol discutidas hasta aquí lo muestran, con notable aproximación, tal como debía aparecer ante un astrónomo situado en las latitudes medias del hemisferio norte, es decir, dentro de un área que incluye a Grecia, Mesopotamia y el norte de Egipto, regiones en las que se llevaron a cabo casi todas las observaciones astronómicas de la antigüedad. Sin embargo, puede observarse dentro de este área una considerable variación cuantitativa en ciertos aspectos del comportamiento del sol, e incluso nos enfrentamos con una serie de cambios cualitativos en las regiones de Egipto situadas más al sur. El conocimiento de tales cambios también ha desempeñado su papel en la elaboración de las antiguas teorías astronómicas. Cuando nos desplazamos hacía el este o hacia el oeste no se observa variación alguna, pero cuando nos desplazamos hacia el sur la sombra que proyecta el gnomon llegado el mediodía decrece constantemente, mientras que el sol ocupa una posición más elevada que la que ocuparía este mismo día en cualquier punto situado más hacia el norte. De forma similar, si bien la duración del día solar verdadero permanece constante, la diferencia entre las horas de luz y las nocturnas para un lugar dado es tanto más pequeña para una determinada fecha cuanto más

meridional dentro de las regiones situadas en el hemisferio boreal sea la localización geográfica del punto en cuestión. Además, en dichas regiones el sol no alcanza puntos situados tan al norte y tan al sur sobre la línea del horizonte durante su recorrido anual como los alcanzados en regiones situadas más al norte. Ninguna de las variaciones que acabamos de indicar modifica las descripciones cualitativas reseñadas líneas más arriba. Sin embargo, un observador que estuviera situado en regiones muy meridionales de Egipto vería como la sombra proyectada por el gnomon al mediodía se reduce día a día hasta que acaba por desaparecer completamente, reapareciendo desde entonces orientada hacia el sur. En las regiones más meridionales de Egipto, la sombra del gnomon a lo largo del decurso anual sigue un comportamiento como el mostrado en la figura 3. Observaciones efectuadas en territorios situados aún más al sur, o mucho más al norte, muestran anomalías diversas en el movimiento observado del sol. Sin embargo, tales variaciones no fueron detectadas por los astrónomos de la antigüedad y dejaremos su discusión para el momento en que abordemos el estudio de las teorías astronómicas que hicieron posible su predicción aun antes de que fueran observadas (pp. 46 ss.).

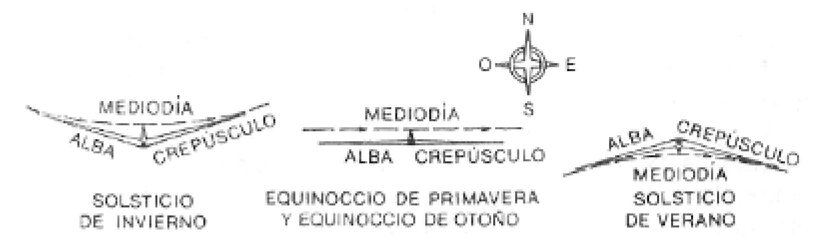


FIGURA 3. — Movimiento de la sombra del gnomon en las zonas tórridas del hemisferio norte durante las diversas estaciones del año.

LAS ESTRELLAS

Los movimientos de las estrellas son mucho más simples y regulares que el del sol. Sin embargo, dicha regularidad no es tan fácilmente reconocible como en el caso anterior, pues un examen sistemático del cielo nocturno requiere habilidad para seleccionar algunas estrellas que nos

permitan repetir su estudio sea cual sea el punto del cielo en que se nos aparezcan. En el mundo moderno, dicha habilidad, que sólo puede ser adquirida a través de una larga práctica, es sumamente rara. Pocos son los individuos que pasan buena parte de la noche mirando hacia las estrellas, y los que así lo hacen, ven interferida con frecuencia su observación de los cielos por los edificios de grandes dimensiones y las iluminaciones de las calles ciudadanas. Por otro lado, la observación del cielo no desempeña una función directa y de primer orden dentro de la vida del hombre medio, mientras que en la antigüedad las estrellas formaban parte integrante del medio ambiente inmediato y cotidiano del hombre y los cuerpos celestes tenían como función universal medir el tiempo y velar por el calendario. Bajo tales circunstancias, la habilidad para identificar a primera vista una serie de estrellas no dejaba de ser algo bastante común. Mucho antes de iniciarse las épocas históricas, hombres cuyo trabajo les obligaba a observar larga y regularmente el cielo nocturno habían agrupado mentalmente las estrellas en constelaciones, grupos de estrellas vecinas que podían ser observadas y reconocidas gracias a sus posiciones relativas invariantes. Cuando deseaba localizar una determinada estrella entre la confusa profusión de puntos brillantes que tachonaban el cielo, un observador comenzaba por buscar la referencia proporcionada por el esquema familiar en cuyo seno sabía se hallaba situada, para detectar, en una operación posterior, la estrella individual objeto de su interés.

Un gran número de las constelaciones citadas por los modernos astrónomos toman sus nombres de figuras mitológicas de la antigüedad, y algunas de ellas se hallan ya citadas unos 3000 años antes de nuestra era en las tablas cuneiformes babilónicas. Así pues, aunque la astronomía moderna haya podido modificar su definición, las principales constelaciones constituyen un patrimonio muy antiguo. Con todo, seguimos ignorando los criterios empleados para formar tales agrupaciones. Pocas son las personas que “reconocen” la figura de un oso en el conjunto estelar que conforma la constelación de la Osa Mayor (figura 4). Otras muchas constelaciones plantean problemas similares, lo cual nos inclina a creer que originariamente las estrellas fueron agrupadas por razones de comodidad y

nombradas arbitrariamente. Dando por cierta tal suposición, cabe admitir cuán extraña es la forma en que fueron agrupadas, pues prácticamente todas las antiguas constelaciones tienen límites sumamente irregulares y ocupan dentro del cielo áreas de muy diversos tamaños. La escasa manejabilidad de tales agrupaciones explica que los astrónomos modernos hayan decidido alterar los límites de buen número de constelaciones. Sin embargo, no por ello debe descartarse la posibilidad de que el pastor o el navegante de la antigüedad, al escrutar hora tras hora los cielos estrellados, "viera" realmente dibujadas por las estrellas las figuras mitológicas que le eran familiares, del mismo modo que nosotros "vemos" algunas veces rostros en las nubes o en los contornos de los árboles. Las experiencias de la moderna psicología de la *gestalt* subrayan la universal necesidad de descubrir esquemas familiares en agrupaciones aparentemente debidas al azar, necesidad que se halla en la base del bien conocido test de las "manchas de tinta" o test Rohrschach. Si conociéramos mejor su origen histórico, no hay duda alguna de que las constelaciones podrían proporcionamos enseñanzas muy útiles acerca de las características mentales de las sociedades primitivas que propusieron las primeras imágenes de aquéllas.

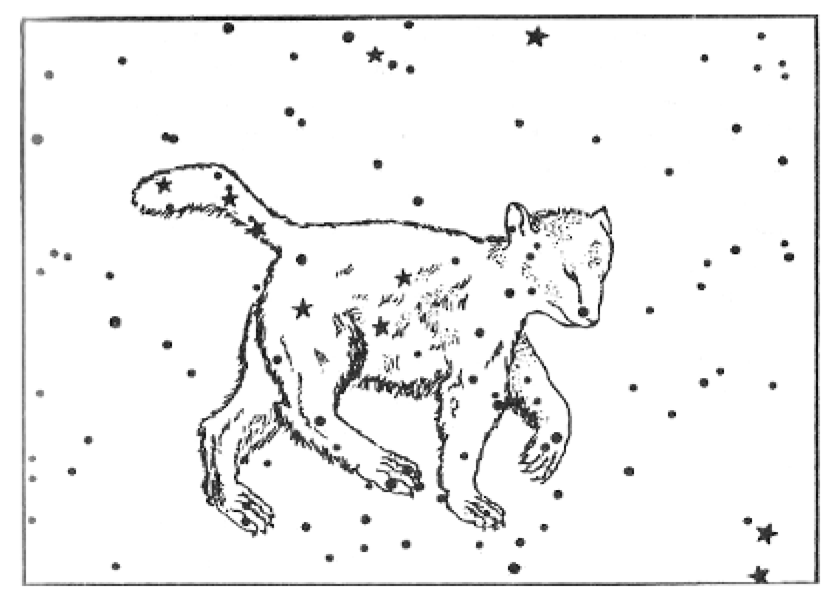


FIGURA 4. — La constelación de la Osa Mayor en el cielo del hemisferio norte. Nótese el familiar Carro cuya vara forma la cola del oso. La estrella polar es la de gran tamaño que sé encuentra situada sobre la oreja derecha del oso: está prácticamente situada en la prolongación de la línea que une las dos estrellas que representan la parte posterior del Carro.

Aprender a reconocer las constelaciones es muy similar a familiarizarse con un mapa, y persigue idénticos objetivos. Las constelaciones nos permiten orientarnos más fácilmente en el cielo. Por ejemplo, conociendo las constelaciones podemos detectar de inmediato un cometa del que sabemos que se halla “en el Cisne”, mientras que es casi seguro que no conseguiríamos localizarlo con la simple información de que está “en el cielo”. Sin embargo, el mapa diseñado a partir de las constelaciones es insólito, pues las constelaciones están en perpetuo movimiento. Pero, como se mueven al unísono, conservando sus formas y sus posiciones relativas, su movimiento no destruye su utilidad. Una estrella de la constelación del Cisne siempre estará en el Cisne, y la distancia entre éste y la Osa Mayor será siempre la misma.[*] No obstante, ni el Cisne ni la Osa Mayor permanecen demasiado tiempo ocupando una misma posición en el cielo, comportándose como ciudades dibujadas sobre un mapa pegado al plato de un fonógrafo que girase sin cesar.

Las posiciones relativas invariables y los movimientos de las estrellas vienen ilustrados por la figura 5, donde se nos muestra la situación y orientación del Carro (parte de la Osa Mayor) en el cielo boreal a tres horas diferentes de una misma noche. La configuración formada por las siete estrellas del Carro es la misma en todos y cada uno de los casos, y lo mismo puede decirse respecto a la posición relativa de éste con relación a la estrella polar, que se encuentra siempre a 29° del lado abierto de la concavidad del Carro y formando una linea recta con las dos últimas estrellas de la parte posterior. Diagramas análogos al expuesto nos mostrarían relaciones geométricas similares y permanentes para las demás estrellas del cielo.

La figura 5 pone de manifiesto otra importante característica de los movimientos estelares: mientras las constelaciones y las estrellas que las conforman se ven arrastradas por el movimiento general de los cielos, la estrella polar siempre permanece ocupando una misma posición fija. De hecho, observaciones más precisas nos muestran que su estaticidad a lo largo de la noche no es perfecta, pero que existe otro punto en el cielo, situado a menos de 1° de la estrella polar, que sí presenta las propiedades a

ella atribuidas en la figura 5. Este punto recibe el nombre de polo norte celeste. Un observador situado en un lugar dado, bajo una latitud boreal, siempre puede encontrarlo, sean cuales fueren la hora y la noche, a una misma distancia angular constante por debajo del norte exacto de su horizonte. Una varilla fijada de tal forma que apunte al polo celeste, siempre continúa haciéndolo al margen del movimiento de los cielos. Al mismo tiempo, el polo celeste se comporta como una estrella, es decir, mantiene su posición geométrica relativa para con las demás estrellas durante largos períodos de tiempo.[*] Puesto que el polo es un punto fijo para todo observador terrestre y que el movimiento de las estrellas no modifica la distancia de éstas a dicho punto, tenemos la impresión de que cada estrella se desplaza siguiendo un arco de círculo cuyo centro es el polo celeste. La figura 5 nos muestra parte de dicho movimiento circular para las estrellas del Carro.

Los círculos concéntricos descritos por los movimientos circumpolares de las estrellas reciben el nombre de círculos diarios, siendo la velocidad con que las estrellas recorren tales círculos alrededor de los 15° por hora. No hay ninguna estrella que recorra un círculo completo desde que se pone el sol hasta que sale, pero un observador que durante una noche despejada siga los movimientos que se producen en el cielo boreal puede ver cómo las estrellas próximas al polo recorren aproximadamente una semicircunferencia. Si reemprende sus observaciones a la noche siguiente, verá como todas y cada una de las estrellas siguen moviéndose con idéntica velocidad a lo largo de los mismos círculos que la noche anterior. Más aún, encontrará a cada estrella exactamente en el punto que habría alcanzado de haber seguido su revolución regular a lo largo del día transcurrido. Desde la antigüedad, la mayor parte de los observadores equipados para reconocer dicha regularidad han admitido con toda naturalidad que las estrellas existen y se desplazan tanto durante el día como durante la noche, pero que durante el día el resplandor de la luz del sol las convierte en invisibles a simple vista. Según tal interpretación, cabe concluir que las estrellas describen regularmente círculos completos cada 23 horas y 56 minutos. Una estrella que esté justamente sobre la estrella polar a las 21 horas del día 23

de octubre, volverá a ocupar idéntica posición a las 20 horas 56 minutos del 24 de octubre, a las 20 horas 52 minutos del 25 de octubre, etc. A finales de año, se situará por encima del polo antes de que se ponga el sol y, por consiguiente, habrá dejado de ser visible para nosotros en esta posición.

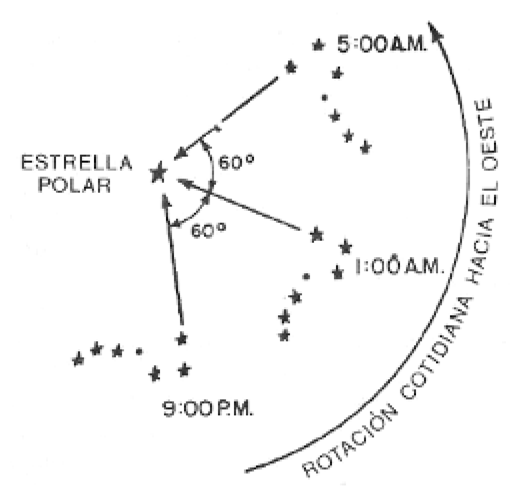


FIGURA 5. — Sucesivas posiciones de la Osa Mayor en el cielo, a intervalos de cuatro horas, en una noche de finales de mes de octubre.

Para latitudes septentrionales medias, el polo celeste está aproximadamente unos 45° por encima del horizonte norte. La altitud angular del polo por encima del horizonte es exactamente igual a la latitud del lugar ocupado por el observador, siendo ésta una de las formas en que puede medirse la latitud de un punto terrestre dado. Por consiguiente, las estrellas que estén a menos de 45° de distancia del polo nunca pueden descender por debajo del horizonte, sea cual sea la altitud del lugar ocupado por el observador, y durante una noche despejada deben ser visibles a cualquier hora. Éstas son las estrellas denominadas circumpolares, las que según la expresión de los cosmólogos del antiguo Egipto “no conocen la destrucción”. Por otra parte, son las únicas estrellas cuyo movimiento es fácilmente reconocible como circular.

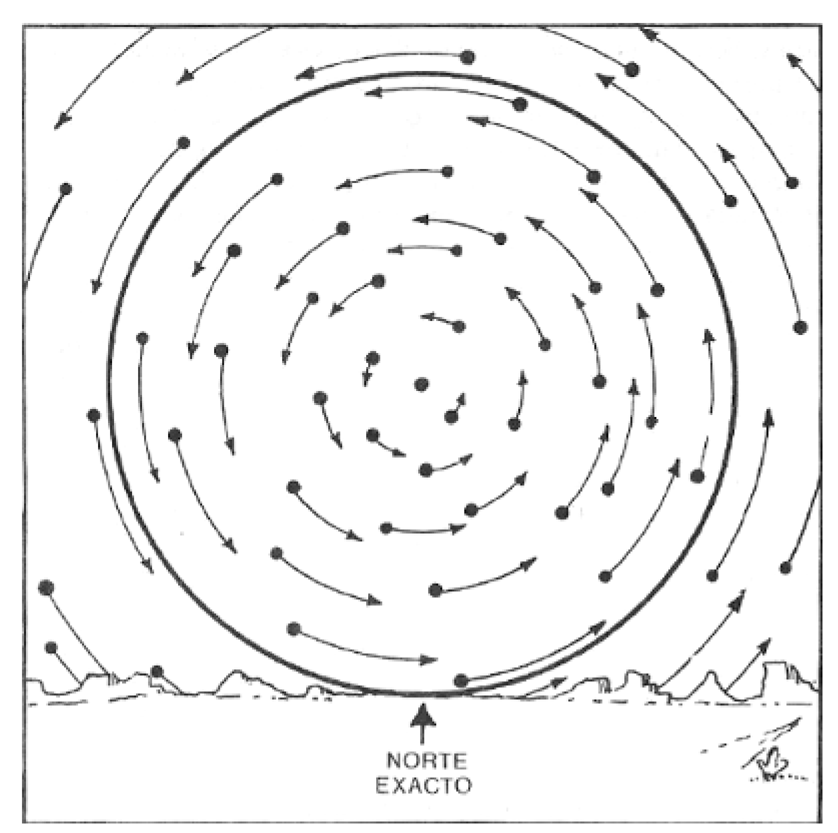


FIGURA 6. — Conjunto de arcos de circulo descritos por algunas estrellas del hemisferio norte durante un período de dos horas. La circunferencia de trazo grueso tangente al horizonte separa las estrellas circumpolares de las que salen y se ponen.

Puede obtenerse una imagen de estas trayectorias estelares mediante una cámara fotográfica con el objetivo dirigido hacia el *polo celeste* y dejando el obturador abierto mientras gira el conjunto de los cielos. Cada hora suplementaria de exposición alarga en 15° el arco descrito por las estrellas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la particular orientación del objetivo introduce una engañosa distorsión. Si el polo celeste está situado 45° por encima del horizonte, que es muy aproximadamente el caso en nuestras latitudes, una estrella que en la figura aparece muy cerca de la parte superior del círculo de separación estará en realidad sobre la misma cabeza del observador. Una vez reconocida esta distorsión, que tiene como origen el ángulo dado a la cámara fotográfica, se hace posible relacionar los trazos de trayectoria estelar de este diagrama con los que aparecen de forma más esquemática en las figuras 7*a* y 7*b*.

Las estrellas más alejadas de los polos también describen círculos diurnos, pero parte de cada uno de dichos círculos se oculta a nuestra vista porque transcurre por debajo del horizonte (figura 6). Así pues, en algunos casos observamos cómo salen o se ponen dichas estrellas, según aparezcan por el horizonte o se oculten bajo él, pero nunca permanecen visibles para nosotros a lo largo de toda la noche. Cuanto más alejadas se hallan del polo, menor es la porción de su trayectoria diurna situada por encima del

horizonte y más difícil se hace reconocer la parte visible de su recorrido como un arco de círculo. Por ejemplo, una estrella que salga por el este sólo es visible a lo largo de la mitad de su círculo diurno. Una tal estrella sigue un recorrido casi idéntico al del sol cuando se aproxima a uno de sus equinoccios, emergiendo a lo largo de una línea oblicua que se eleva hacia el sur (figura 7*a*), alcanzando su máxima altitud en un punto situado por encima del hombro derecho de un observador que mirara hacia el este y, finalmente, poniéndose por el oeste según una línea oblicua que desciende en dirección norte. Las estrellas que se hallen a distancias aún mayores del polo tan sólo efectuarán breves apariciones por encima del horizonte austral. Cerca del polo sur exacto, las estrellas se esconden poco después de haber hecho su aparición y jamás se elevan demasiado por encima del horizonte (figura 7*b*). Puesto que durante casi la mitad del año dichas estrellas salen y se ponen durante el día, son muchas las noches durante las cuales no aparecen en absoluto sobre el cielo.

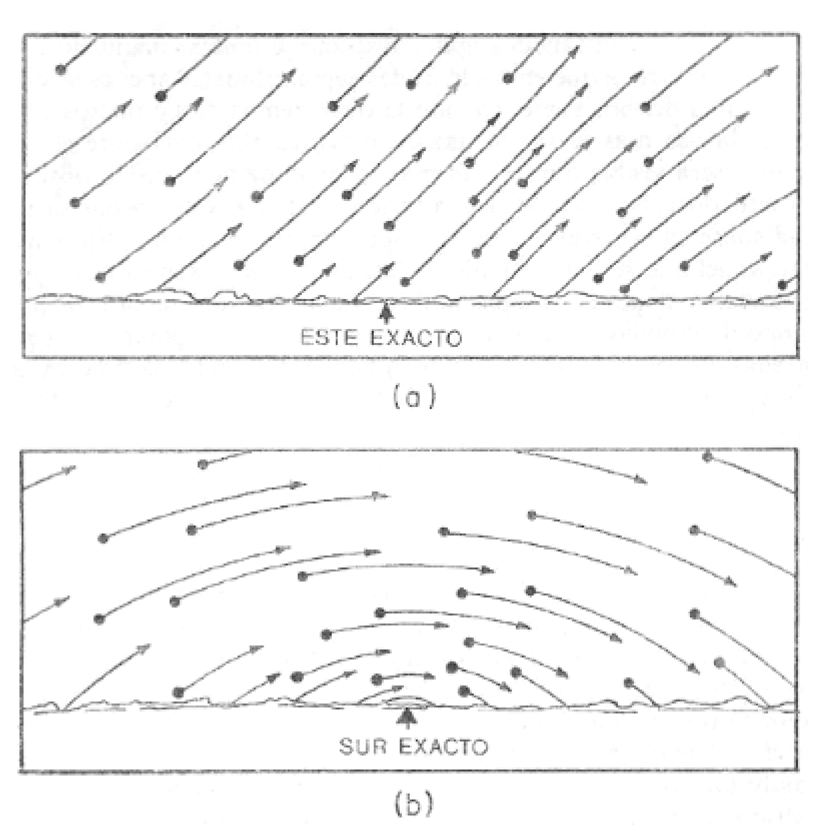


FIGURA 7. — Trayectorias estelares sobre el horizonte este (*a*) y el horizonte sur (*b*). Como en la figura 6, estos esquemas muestran el movimiento de algunas estrellas típicas sobre una sección del

horizonte que abarca 90° durante un período de dos horas. Sin embargo, en los presentes diagramas la "cámara fotográfica" está orientada hacia el horizonte, de tal forma que sólo nos permite contemplar las estrellas situadas dentro de los primeros 40° por encima del mismo.

Las características cualitativas del cielo nocturno que acabamos de exponer son comunes a toda el área en que fueron llevadas a cabo las observaciones astronómicas de la antigüedad. Sin embargo, tal descripción precisa ser perfilada mediante una serie de diferencias cuantitativas ampliamente significantes. Cuando un observador se dirige hacia el sur, la altitud del polo celeste por encima del horizonte boreal decrece alrededor de un 1° cada 110 kilómetros de recorrido. Las estrellas siguen describiendo sus círculos diurnos alrededor del polo, pero como éste se halla más próximo al horizonte, el observador ve emerger y ponerse ciertas estrellas que eran circumpolares mientras estaba situado en latitudes más septentrionales. Las estrellas que salen por el este exacto y se ponen por el oeste exacto continúan apareciendo y desapareciendo por los mismos puntos sobre el horizonte, pero al ir hacia el sur parece que se muevan a lo largo de una línea casi perpendicular al horizonte y que alcancen su máxima altitud prácticamente por encima de la cabeza del observador. El aspecto del cielo austral cambia de manera aún más asombrosa. A medida que la estrella polar declina hacia el horizonte boreal, las estrellas situadas en el cielo austral alcanzan una mayor altitud sobre el horizonte austral dado que su distancia angular respecto al polo se mantiene constante. Una estrella que en las latitudes septentrionales apenas se eleve por encima del horizonte, cuando la observemos desde puntos situados cada vez más al sur alcanzará mayores altitudes sobre el horizonte y será visible durante un mayor lapso de tiempo. Un observador situado más al sur verá una serie de estrellas que apenas se asoman sobre su horizonte, pero que son completamente invisibles para todo aquel que se halle situado en latitudes más septentrionales. Si el observador continúa desplazándose hacia el sur, tendrá bajo su campo de visibilidad cada vez menos estrellas circumpolares, es decir, estrellas visibles a lo largo de toda la noche. En contrapartida, en uno u otro momento, tendrá oportunidad de observar estrellas que un individuo situado en el hemisferio norte jamás podrá ver.

El sol considerado como una estrella móvil

Puesto que las estrellas y el polo celeste mantienen sus posiciones relativas de forma permanente, con el tiempo es posible establecer sus correspondientes localizaciones sobre un mapa de los cielos o mapa estelar. La figura 8 propone uno de tales mapas posibles, y el lector puede encontrar otros muchos distintos en cualquier atlas o libro de astronomía. El mapa de la figura 8 contiene todas las estrellas más brillantes que puede ver un observador situado en latitudes septentrionales medias; sin embargo, no todas estas estrellas pueden ser vistas a un mismo tiempo, pues no todas ellas se encuentran simultáneamente por encima del horizonte. En cualquier instante de la noche, aproximadamente las dos quintas partes del número total de estrellas representadas en la figura adjunta se encuentran por debajo del horizonte.

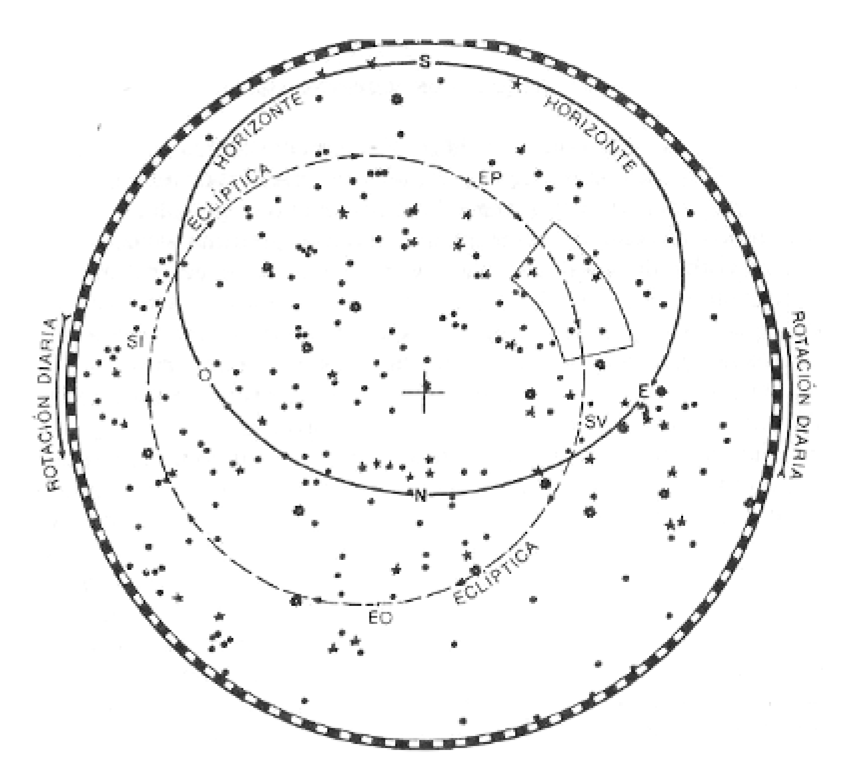


FIGURA 8. — Mapa circumpolar del cielo en el que aparecen las principales estrellas visibles permanentemente para un observador situado alrededor de los 45° de latitud norte. La cruz situada en el centro geométrico del mapa señala la posición del polo celeste.

Si se mantiene el mapa en posición horizontal por encima de la cabeza con la cara impresa mirando al suelo y su parte inferior dirigida hacia el norte, nos mostrará la disposición de las estrellas

tal como se le aparece a un observador situado en latitudes boreales medias a las 9 de la noche del día 23 de octubre. Las estrellas situadas dentro de la línea en trazo continuo que limita la ventana-horizonte son las visibles para el observador; las que están fuera de dicha línea se hallan, en el día y hora indicados, por debajo del horizonte. Las estrellas interiores a la ventana-horizonte situadas cerca del punto *N* del mapa serán observadas justamente sobre el punto norte exacto del horizonte físico del observador (obsérvese la situación Carro); las situadas cerca del punto este *E*, estarán a punto de salir por el este, y así sucesivamente. Para saber cuál será la posición de las estrellas a una hora más avanzada del mismo 23 de octubre, debe imaginarse que la ventana-horizonte permanece inmóvil mientras el mapa circular gira por detrás de ella en sentido inverso a las agujas de un reloj a razón de 15° cada hora, contada a partir de las 9 de la noche. El movimiento indicado mantiene el polo estacionario, pero hace ascender una serie de estrellas por encima del horizonte este mientras otras desaparecen por debajo del horizonte oeste. Para encontrar la posición de las estrellas a las 21 horas de otro día cualquiera, deberá girarse el mapa por detrás de la ventana-horizonte estacionaria en el sentido de las agujas de un reloj a razón de 1° cada día, contado a partir del 23 de octubre. Combinando ambas operaciones, pueden determinarse las posiciones de las estrellas a cualquier hora de cualquier noche del año.

La línea de trazo discontinuo que circunda el polo celeste es la eclíptica, trayectoria aparente del sol a través de las estrellas (cf. p. 37). El rectángulo que engloba parte de la eclíptica y aparece en el cuadrante superior derecho del mapa contiene la región del cielo que aparece de forma más ampliada en las figuras 9 y 15.

Las estrellas visibles y la región del cielo en que aparecen dependen de la fecha y la hora en que se efectúe la observación. Por ejemplo, la línea de trazo continuo en el mapa, sobre la que están indicados los cuatro puntos cardinales, acota la región del cielo visible para un observador situado sobre latitudes septentrionales medias a las 21 horas del día 23 de octubre. Representa, por consiguiente, el horizonte de dicho observador. Si el observador sostiene el mapa por encima de su cabeza con la parte inferior del mismo apuntando hacia el norte, los cuatro puntos cardinales se corresponden muy aproximadamente con los de su horizonte físico. El mapa nos indica entonces que, en este momento de la noche y del año, la Osa Mayor aparece justamente por encima del horizonte boreal y que, por ejemplo, la constelación de Casiopea se encuentra en una región próxima al centro de la región visible del cielo, casi encima mismo de la cabeza del observador. Dado que las estrellas retornan a su posición de partida al cabo de 23 horas y 56 minutos, la misma orientación del mapa debe indicarnos la posición de las estrellas a las 20 horas 56 minutos del 24 de octubre, a las

20 horas 52 minutos del 25 de octubre, a las 20 horas 32 minutos del 30 de octubre, y así sucesivamente.

Supongamos ahora que la línea de trazo continuo que representa al horizonte que limita el campo de visión del observador se mantiene en la misma posición que ocupa con respecto a la página del libro mientras que el disco del mapa, junto con todos los elementos restantes del mismo, gira lentamente alrededor de su centro, el polo, en sentido opuesto al de las agujas del reloj. Si el disco gira 15°, aparecen en la ventana-horizonte las estrellas que son visibles a las 22 horas del día 23 de octubre, o a las 21 horas 56 minutos del 24 de octubre, y así sucesivamente. Si aplicamos al conjunto del mapa un giro de 45°, aparecerán dentro de la ventana-horizonte las estrellas visibles en la medianoche del 23 de octubre. De este modo puede determinarse la posición de todas las estrellas más brillantes a cualquier hora de cualquier noche del año. Un mapa del cielo, como el representado en la figura 8, que posea una ventana-horizonte fija recibe usualmente el nombre de “buscador de estrellas”.

Los mapas del cielo tienen también otras aplicaciones distintas a la de localizar astros que, como sucede con las estrellas, mantienen constantes sus posiciones relativas. Podemos servirnos de ellos para describir el comportamiento de cuerpos celestes, tales como la luna, los cometas y los planetas, que evolucionan lentamente a través de las estrellas. Los antiguos sabían que el movimiento solar se simplifica cuando se relaciona con las estrellas. Puesto que las estrellas aparecen casi inmediatamente después de ponerse el sol, un observador que sepa seguir sus movimientos puede registrar el instante y la posición del sol en el horizonte en el momento de su puesta, medir el tiempo transcurrido entre la puesta del sol y la primera aparición de las estrellas y, a continuación, localizar el sol en un mapa celeste haciendo girar éste hacia atrás con el fin de determinar qué estrellas se encontraban en la posición apropiada del horizonte cuando el sol se puso. Un observador que anote la posición del sol sobre una carta celeste durante varios días consecutivos encontrará que aquella se mantiene prácticamente inalterada. La figura 9 muestra la posición del sol sobre un mapa celeste durante todos y cada uno de los días de un mes. Esta posición no es siempre

la misma, pero la variación que sufre entre una y otra observación es muy pequeña; cada tarde el sol se encuentra alejado alrededor de 1° de la posición que ocupaba en la víspera, es decir, a una distancia relativamente pequeña, equivalente a unas dos veces su diámetro angular.

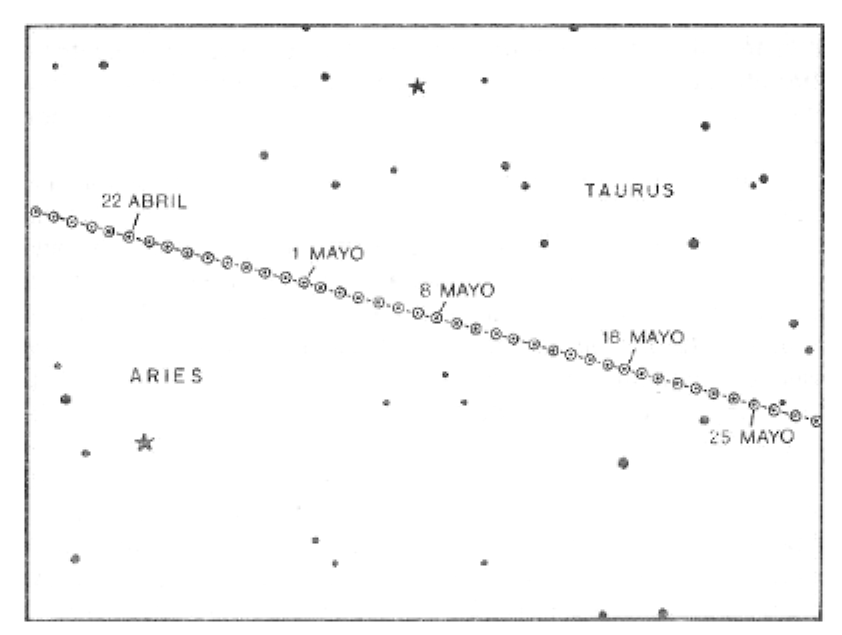


FIGURA 9. — Movimiento del sol a través de las constelaciones Aries y Taurus. Los círculos representan la posición ocupada por el sol en el momento de ponerse durante varias noches sucesivas, de mediados de abril a finales de mayo.

Las observaciones precedentes sugieren que tanto el movimiento cotidiano del sol como su desplazamiento, efectuado de forma más lenta, hacia el norte y hacia el sur del horizonte pueden ser cómodamente analizados si se considera al sol como un cuerpo que se mueve muy despacio y día a día entre las estrellas. Si un día determinado se precisa cuál es la posición que ocupa el sol con respecto a las estrellas, su movimiento durante este día será prácticamente idéntico al movimiento diurno de una estrella que ocupara su posición en el mapa celeste. Ambos cuerpos celestes se moverán como puntos sobre el mapa en rotación, levantándose por el este, progresando según una línea inclinada hacia el sur y, finalmente, desapareciendo por el oeste. Al cabo de un mes, el sol seguirá efectuando un movimiento equivalente al movimiento diurno de una estrella, pero ahora será, en la práctica, el de una estrella situada a 30° de distancia de la

que sustituía durante el mes anterior. En el transcurso del mes el sol se ha desplazado lenta y regularmente entre las dos posiciones indicadas, distantes una de otra 30° sobre el mapa. Cada día el movimiento solar sobre un arco de círculo centrado en el polo celeste habrá sido más semejante al de una estrella, pero no al de la misma en dos días consecutivos.

Si marcamos sobre un plano celeste las posiciones ocupadas por el sol día tras día en el momento de ponerse y unimos dichos puntos, se obtiene una curva regular que se cerrará sobre sí misma al transcurrir un año. Esta curva se denomina eclíptica, y viene indicada en la figura 8 a través de la línea de trazos discontinuos. El sol ocupa siempre alguno de los puntos de dicha línea. Puesto que la eclíptica es arrastrada rápidamente a través de los cielos por el normal movimiento diurno del sistema estelar, el sol sale y se pone como una estrella que se encontrara sobre un determinado punto de la eclíptica, viéndose arrastrado también por el movimiento de conjunto de los cielos. Pero a un mismo tiempo, el sol se desplaza lentamente alrededor de la eclíptica y ocupando una posición ligeramente distinta cada día, hora o minuto. Así pues, el complejo movimiento helicoidal del sol puede ser considerado como la resultante de dos movimientos mucho más simples. El movimiento aparente total del sol es la composición de su movimiento diurno (el movimiento circular de rotación hacia el oeste en sentido opuesto al de las agujas del reloj que sigue el mapa celeste en su conjunto) y un lento movimiento simultáneo (movimiento hacia el este, según el sentido de las agujas del reloj, alrededor del polo celeste y dentro del plano del mapa) a lo largo de la eclíptica.

Analizado de esta forma, el movimiento del sol puede ser comparado con el del individuo que cobra el importe de los viajes sobre un tiovivo. El cobrador es arrastrado por las rápidas revoluciones de la plataforma, pero puesto que se desplaza lentamente de un caballito a otro para poder cobrar, su movimiento no es exactamente el mismo que el de los jinetes. Si se desplaza en sentido opuesto al que sigue la plataforma en su giro, su movimiento con respecto al suelo será ligeramente más lento que el de ésta y los jinetes completarán una vuelta más rápidamente que él. Si sus funciones de cobro le acercan o le alejan del centro de la plataforma, su

movimiento total con respecto al suelo no será completamente circular, sino que seguirá una curva compleja que no se cerrará sobre sí misma después de cada revolución. Si bien es perfectamente posible determinar con precisión el trayecto seguido por el cobrador en relación al suelo inmóvil, es mucho más simple dividir el movimiento total en sus dos componentes: una rotación regular y rápida efectuada solidariamente con la plataforma y un movimiento menos regular y más lento respecto a la plataforma. Desde la antigüedad los astrónomos han recurrido a dicha descomposición para analizar el movimiento aparente del sol. El sol sigue cada día su rápida carrera hacia el oeste *acompañando a las estrellas* (es el denominado movimiento diurno del sol); simultáneamente, se desplaza con lentitud hacia el este, a lo largo de la eclíptica, *a través de las estrellas* o *con respecto a las estrellas* (es el denominado movimiento anual del sol).

Una vez dividido el movimiento total del sol en sus dos componentes, resulta fácil describir su comportamiento de forma simple y precisa. Para ello basta con designar qué día y a qué hora alcanza cada punto de la eclíptica, la sucesión de los cuales determina la componente anual del movimiento solar, mientras que la componente diurna restante queda determinada por la rotación diaria del mapa celeste en su conjunto. Por ejemplo, sobre la eclíptica, que en la figura 8 aparece como un círculo algo deformado y considerablemente descentrado, debe existir un punto *SV*, el punto de la misma que más cerca está del polo central. No hay ningún otro punto de la eclíptica que emerja y se ponga tan al norte como dicho punto *SV*, ni que permanezca tan largo tiempo dentro de la ventana-horizonte durante la rotación del mapa. Así pues, el punto *SV* representa el solsticio de verano, y el centro del sol debe estar situado sobre dicho punto hacia el día 22 de junio de cada año. De forma similar, los puntos *EO* y *EP* de la figura 8 son los puntos equinocciales, los dos puntos de la eclíptica que se levantan y se ponen por el este y el oeste verdaderos y que permanecen dentro de la ventana-horizonte exactamente durante la mitad de cada rotación completa del mapa. El centro del sol debe pasar por ellos el 23 de septiembre y el 21 de marzo respectivamente, del mismo modo que debe pasar por el punto *SI*, el punto de la eclíptica más alejado del polo celeste,

hacia el 22 de diciembre. Los solsticios y los equinoccios, que inicialmente surgieron como días del año, han recibido posteriormente una definición más precisa y más útil desde el punto de vista astronómico. Unos y otros son considerados como puntos del cielo o del mapa estelar. Junto con las fechas correspondientes (o los instantes correspondientes, pues el centro del sol pasa instantáneamente sobre cada punto), estos puntos particulares de la eclíptica especifican la dirección y la velocidad aproximada del movimiento anual del sol. Conocidos estos puntos de referencia y algunos otros y sabiendo simular el movimiento diurno mediante la rotación del mapa celeste, es perfectamente posible determinar la hora y posición de la salida y la puesta del sol, así como la altitud máxima que alcanzará éste en cualquier día del año.

Los solsticios y los equinoccios no son los únicos puntos de la eclíptica que reciben nombres particulares. Sobre un mapa celeste, la eclíptica atraviesa un conjunto de constelaciones singularmente importantes conocidas como los signos del zodíaco. Según una convención que data de épocas muy remotas, los doce signos del zodíaco dividen la eclíptica en doce segmentos de idéntica longitud. Decir que el sol está "en" tal o tal otra constelación equivale a especificar de forma aproximada cuál es la posición que ocupa sobre la eclíptica, posición que, a su vez, especifica la estación del año en que nos hallamos. El paso anual del sol a través de los doce signos parece controlar el ciclo de las estaciones. Tal observación es una de las bases de la ciencia o pseudociencia de la astrología, de la que nos ocuparemos con cierto detenimiento en el capítulo tercero.

EL NACIMIENTO DE LA COSMOLOGÍA CIENTÍFICA: EL UNIVERSO DE LAS DOS ESFERAS

Las observaciones descritas en las tres secciones inmediatamente precedentes constituyen una parte importante de los datos utilizados por los astrónomos de la antigüedad para analizar la estructura del universo. Sin embargo, en sí mismas, tales observaciones no nos proporcionan ninguna

enseñanza directa sobre dicha estructura. Nada nos dicen acerca de la composición de los cuerpos celestes o de las distancias que los separan; no dan ninguna indicación explícita sobre las dimensiones, posición o forma de la tierra; aunque la forma de dar cuenta de las observaciones pueda enmascarar los hechos, lo cierto es que no indican ni siquiera que los cuerpos celestes se hallen realmente en movimiento. Así pues, un observador sólo puede estar seguro de un hecho: que la distancia angular entre un cuerpo celeste y el horizonte varía constantemente. Con todo, dicho cambio tanto puede venir causado por un movimiento del horizonte como por un movimiento de los cuerpos celestes. Expresiones tales como ponerse el sol, levantarse el sol o movimiento diurno de una estrella no proceden en modo alguno de hechos de observación propiamente dichos. Por el contrario, cabe censarlos a cuenta de una interpretación de los hechos que, aun siendo tan natural que difícilmente se puede evitar el uso del vocabulario característico de las observaciones, no hay duda alguna de que va mucho más allá del contenido estricto de los hechos observados. Así pues, puede darse el caso de que dos astrónomos estén plenamente de acuerdo en cuanto a los resultados de una observación pero en completo desacuerdo sobre cuestiones tan básicas como la de si es real el movimiento de las estrellas.

Las observaciones como las que hemos discutido en líneas precedentes no son, pues, más que claves para resolver un rompecabezas, del que son tentativas de solución las diversas teorías inventadas por los astrónomos. Tales claves son en cierto sentido objetivas, dadas por la naturaleza; el resultado numérico de este tipo de observaciones depende muy escasamente de la imaginación o de la personalidad del observador (si bien la forma de presentar los datos de experiencia sí puede depender). Pero las teorías o esquemas conceptuales derivados de la observación sí dependen de la imaginación del científico; de hecho, son subjetivos de cabo a rabo. Queda explicado, pues, por qué observaciones como las que hemos discutido en secciones precedentes podían ser agrupadas y sistematizadas por hombres cuyas creencias sobre la estructura del universo fueran similares a las mantenidas por los antiguos egipcios. Las observaciones no implican por sí

mismas consecuencias cosmológicas *directas*; no necesitan ser tomadas demasiado en serio, y efectivamente no lo han sido a lo largo de milenios, para proceder a la elaboración de una cosmología. La tradición que propugna que las observaciones astronómicas precisas constituyan la base sobre la que edificar el pensamiento cosmológico es, en sus rasgos esenciales, característica de la civilización occidental. Parece ser una de las novedades más significativas y características que hemos heredado de la antigua Grecia.

Los documentos fragmentarios más antiguos que conservamos sobre el pensamiento cosmológico griego dan testimonio explícito de una preocupación por explicar dentro de un marco teórico las observaciones efectuadas sobre estrellas y planetas. En el siglo VI antes de nuestra era, Anaximandro de Mileto enseñaba que:

Las estrellas son porciones comprimidas de aire, en forma de ruedas, rellenas de fuego, que expulsan llamaradas por algunos de sus puntos a través de pequeños orificios […].

El sol es un círculo veintiocho veces más grande que la tierra; semeja una rueda de carro con las llantas huecas y llenas de fuego que deja escapar a través de una abertura similar al canuto de un fuelle […].

Los eclipses de sol se producen cuando se cierra el orificio por el que sale el fuego […].

La luna es un círculo diecinueve veces más grande que la tierra, semejante a una rueda de carro con las llantas huecas y llenas de fuego, lo mismo que el sol y situada oblicuamente igual que éste. También posee un solo orificio semejante al canuto de un fuelle; sus eclipses dependen de las revoluciones de la rueda.[1.1]

Desde el punto de vista astronómico, estos conceptos son mucho más avanzados que los de los egipcios. Los dioses han cedido el lugar a una serie de mecanismos familiares al hombre. Se discuten las dimensiones y localizaciones de planetas y estrellas. Si bien las respuestas dadas a tales

cuestiones pueden parecer en extremo rudimentarias, lo cierto es que era de todo punto necesario que se plantearan tales problemas antes de estar en condiciones de recibir respuestas maduras y reflexionadas. En el fragmento de Anaximandro que acabamos de citar, las trayectorias diurnas de las estrellas y del sol son tratadas de forma bastante satisfactoria al presentar a los cuerpos celestes como orificios sobre las llantas de ruedas en rotación. Los mecanismos imaginados para dar cuenta de los eclipses y del trayecto anual del sol (estimado este último a través de la posición oblicua del círculo solar) son menos satisfactorios, pero tienen el mérito de haber sido un primer paso hacia la resolución de dichos problemas. La astronomía comienza a desempeñar un papel de primera magnitud dentro del pensamiento cosmológico.

No todos los filósofos y astrónomos griegos estaban de acuerdo con Anaximandro. Algunos de sus contemporáneos y de sus sucesores adelantaron otras teorías distintas, pero en todas ellas se enfrentaban con los mismos problemas y empleaban las mismas técnicas para darles solución. Para nosotros lo importante son los problemas y las técnicas de resolución. No es necesario exponer las diversas teorías en competencia; además, tampoco podríamos dar un esquema suficientemente completo, pues los documentos históricos de que disponemos son muy fragmentarios como para permitir algo más que conjeturas acerca de cuál fue la evolución de las primeras ideas griegas sobre el universo. No es hasta bien entrado el siglo IV antes de nuestra era que los documentos adquieren un mayor grado de fiabilidad y que, como resultado de una lenta y larga evolución, se alcanza un acuerdo bastante generalizado sobre los puntos esenciales. A partir del siglo IV antes de nuestra era, para la mayor parte de los filósofos y astrónomos griegos la tierra era una esfera inmóvil muy pequeña que estaba suspendida en el centro geométrico de una esfera en rotación, mucho mayor, que llevaba consigo a las estrellas. El sol se desplazaba por el vasto espacio comprendido entre la tierra y la esfera de las estrellas. Más allá de la esfera exterior no había nada, ni espacio ni materia. Ésta no fue la única teoría sobre el universo mantenida durante la antigüedad clásica, pero sí fue la que contó con mayor número de defensores. El mundo medieval y

moderno no hicieron más que heredar de sus predecesores una versión desarrollada de la teoría de las dos esferas.

El universo de las dos esferas está compuesto por una esfera interior para el hombre y otra exterior para las estrellas. Ante todo, debe quedar claro que la expresión “universo de las dos esferas” es un anacronismo. En el capítulo siguiente veremos cómo todos los filósofos y astrónomos que creían en las esferas celeste y terrestre también postulaban la existencia de dispositivos cosmológicos adicionales que en su carrera arrastraban a través del espacio que se extendía entre ambas al sol, a la luna y a los planetas. Así pues, el universo de las dos esferas no es en modo alguno una verdadera cosmología, sino un marco estructural en que encuadrar concepciones globales sobre el universo. Por otra parte, dicho marco estructural alumbraría un gran número de sistemas astronómicos y cosmológicos diferentes y contradictorios durante los diecinueve siglos que separan el siglo IV antes de nuestra era y la época de Copérnico. De hecho, existieron diversos universos de dos esferas, pero lo importante para nosotros es que una vez impuesto tal esquema puede decirse que casi nunca se puso en discusión su veracidad. Durante casi dos milenios ha guiado la imaginación de todos los astrónomos y de la mayor parte de los filósofos. Tal es el motivo que nos impulsa a comenzar nuestro análisis de la principal tradición astronómica de occidente con un examen del universo de las dos esferas, a pesar de no ser más que un marco de referencia y aun a costa de dejar de lado los diversos dispositivos planetarios propugnados por tal o cual astrónomo a fin de completarlo.

El origen del sistema de las dos esferas es oscuro pero, en contrapartida, no lo es en absoluto comprender las razones que sustentan su fuerza de persuasión. La esfera de los cielos es muy similar a la bóveda celeste propuesta por babilonios y egipcios y, ciertamente, no puede negarse que existe semejanza entre el cielo y una bóveda. La forma alargada que los egipcios daban al cielo desaparece en aquellas civilizaciones que no han florecido en las riberas de un río como el Nilo para dejar su lugar a una especie de caparazón hemisférico. La unión de dos bóvedas simétricas situadas por encima y por debajo de la tierra da al universo una envoltura

apropiada y satisfactoria. La rotación de la esfera nos viene indicada por las propias estrellas; no tardaremos en ver cómo la rotación regular de la esfera exterior, efectuando una vuelta completa cada 23 horas 56 minutos, produce precisamente los círculos diurnos ya descritos en páginas anteriores.

Además, hay un argumento de orden estético en favor de un universo esférico. Puesto que las estrellas se desplazan formando un todo y parecen ser lo más alejado de nosotros que nos es dado observar, es natural suponer que no sean otra cosa que simples marcas sobre la superficie externa del universo y que se desplacen solidariamente con dicha superficie. Asimismo, dado que las estrellas se mueven eternamente con una regularidad perfecta, la superficie sobre la que se mueven debe ser también perfectamente regular y su movimiento siempre el mismo. ¿Qué figura responde mejor a tales condiciones que la esfera, la única superficie perfectamente simétrica y una de las pocas que puede girar eternamente sobre sí misma ocupando exactamente el mismo espacio en todos y cada uno de los instantes de su movimiento? ¿Bajo qué otra forma podría haber sido creado un universo eterno y autosuficiente? Éste es el argumento primordial dado por Platón en su *Timeo*, escrito en el siglo IV antes de nuestra era, historia alegórica de la creación en la que el mundo aparece como un organismo, como un animal:

Y lo ha combinado así [su constructor], primero para que el Todo fuera en lo posible un viviente perfecto, formado de partes perfectas; en segundo lugar, para que fuera único, sin que fuera de él quedara nada de lo que pudiera nacer otro viviente de la misma clase; y, finalmente, para que se viera libre de vejez [eterno] y enfermedad [incorruptible] […]. Ésta es la razón de que Dios haya formado el mundo en forma esférica y circular, siendo las distancias por todas partes iguales, desde el centro hasta los extremos. Ésa es la más perfecta de todas las figuras y la más completamente semejante a sí misma. Pues Dios pensó que lo semejante es mil veces más bello que lo desemejante. En cuanto a la totalidad de su superficie exterior, la ha pulido y redondeado exactamente, y esto por varias razones. En primer lugar, el mundo no tenía ninguna necesidad de ojos, ya que no quedaba nada visible fuera de él, ni de orejas, ya que tampoco

quedaba nada audible. No lo rodeaba ninguna atmósfera que hubiera exigido una respiración. Tampoco tenía necesidad de ningún órgano, bien fuera para absorber el alimento, bien para expeler lo que anteriormente hubiera asimilado. Pues nada podía salir de él por ninguna parte, y nada tampoco podía entrar en él, ya que fuera de él no había nada. En efecto, es el mundo mismo el que se da su propio alimento por su propia destrucción. Todas sus pasiones y todas sus operaciones se producen en él, por sí mismo, de acuerdo con la intención de su autor. Pues el que lo construyó pensó que seria mejor si se bastaba a sí mismo que no si tenía necesidad de alguna cosa. No tenían para él ninguna utilidad las manos, hechas para coger o apartar algo, y el artista pensó que no había necesidad de dotarle de estos miembros superfluos, ni le eran tampoco útiles los pies, ni, en general, ningún órgano adaptado a la marcha […]. Por esta razón, imprimiendo sobre él una revolución uniforme en el mismo lugar, hizo que se moviera con una rotación circular.[1.2]

Muchos de los argumentos dados por los antiguos en favor de la esfericidad de la tierra eran del mismo orden que el platónico: ¿qué otra figura podría convenir mejor a la tierra, morada del hombre, que la misma figura perfecta con la que ha sido creado el universo? Con todo, un buen número de las demostraciones dadas a la esfericidad del globo terráqueo son más concretas y familiares. El casco de un navío que se aleja de la orilla desaparece ante nuestros ojos antes que el extremo de su mástil; por otra parte, veremos una mayor parte del navío y de la superficie de la mar cuanto más elevado se halle nuestro observatorio (figura 10). La sombra de la tierra sobre la luna durante un eclipse de esta última siempre tiene un borde circular. (La explicación de los eclipses, frecuente incluso en épocas anteriores al siglo IV antes de nuestra era, será analizada más detalladamente en la sección tercera del Apéndice técnico.) Estos argumentos son difíciles de eludir o refutar aún en nuestros días, y en la antigüedad se extendía su eficacia, por analogía, de la tierra a los cielos, es decir, parecía desde todo punto apropiado que la región celeste reflejara la

forma de la tierra. Otra serie de argumentos derivaba de la similitud y de la disposición simétrica de las dos esferas. Por ejemplo, la posición central ocupada por la tierra la mantenía inmóvil en el seno de un universo esférico. ¿En qué dirección podía caer un cuerpo situado en el centro de una esfera? No existe "abajo" respecto al centro y todas las direcciones apuntan idénticamente hacia "arriba". En consecuencia, la tierra debe permanecer suspendida en el centro, eternamente estable, mientras el universo gira a su alrededor.

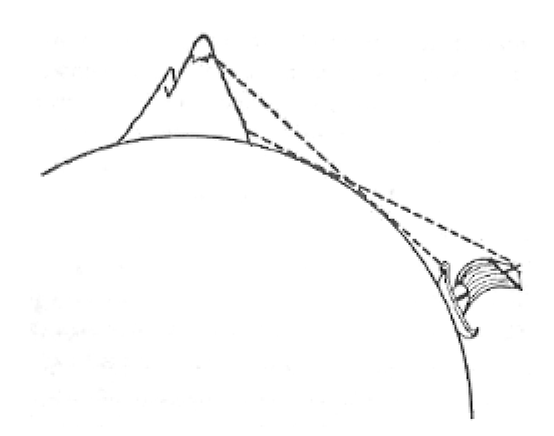


FIGURA 10. — Antigua prueba (y también moderna) en favor de la esfericidad de la tierra. Un observador situado al pie de la montaña sólo puede ver la parte superior del mástil por encima de su horizonte, mientras que si se halla en la cima del monte se le hacen visibles todo el mástil y parte del casco.

Aunque los argumentos derivados de la simetría del sistema global puedan parecernos extraños en la actualidad (los argumentos que llevan a conclusiones que se han visto desacreditadas acostumbran a parecer extraños), tuvieron una gran preponderancia tanto en el pensamiento antiguo y medieval como en el de los tiempos modernos. Una discusión sobre la simetría como la de Platón muestra la coherencia de la cosmología de las dos esferas y explica por qué el universo fue creado bajo la forma esférica. Más importante aún, tal como veremos en los capítulos 3 y 4, la simetría del universo de las dos esferas establecía estrechos vínculos entre el pensamiento astronómico, el pensamiento físico y el pensamiento teológico, pues era esencial para todos ellos. En el capítulo 5 veremos cómo Copérnico se esfuerza en vano por preservar la simetría esencial de la

antigua cosmología dentro de un universo en el que la tierra no es más que otro planeta dotado de movimiento. Pero lo que ahora ocupa nuestra atención es el estudio de las propiedades astronómicas del universo de las dos esferas, y, a este respecto, el caso goza de una claridad meridiana. En astronomía, la cosmología de las dos esferas es totalmente pertinente; es decir, da cuenta con toda precisión de las observaciones de los cielos descritas en las primeras secciones del presente capítulo.

La figura 11 nos muestra una tierra esférica, de dimensiones muy exageradas, situada en el centro de una esfera mayor, la de las estrellas. Un observador terrestre que esté situado en el punto *A*, indicado por la flecha, sólo puede ver la mitad de la esfera. Su horizonte está limitado por un plano (rayado en la figura) tangente a la tierra en el punto en que se encuentra situado. Si la tierra es muy pequeña comparada con la esfera de las estrellas, dicho plano tangente dividirá la esfera exterior en dos partes casi exactamente iguales, una de ellas visible para el observador y la otra fuera de su ámbito de observación por ocultársela la propia tierra. Todo objeto engarzado en la superficie esférica exterior, tal como las estrellas, siempre mantendrá respecto a los demás una misma posición cuando se le observe desde la minúscula tierra, situada en el centro del sistema global. Si la esfera gira con regularidad alrededor de un eje que pase por los puntos diametralmente opuestos *N* y *S*, todas las estrellas, excepto las situadas en *N* o *S*, se verán arrastradas por dicho movimiento. Puesto que *S* es invisible para un observador situado en *A*, *N* será el único punto inmóvil del cielo que podrá ver, es decir, su polo celeste. Si el observador está situado sobre una latitud septentrional media, dicho polo estará situado alrededor de 45° por encima de su horizonte norte.

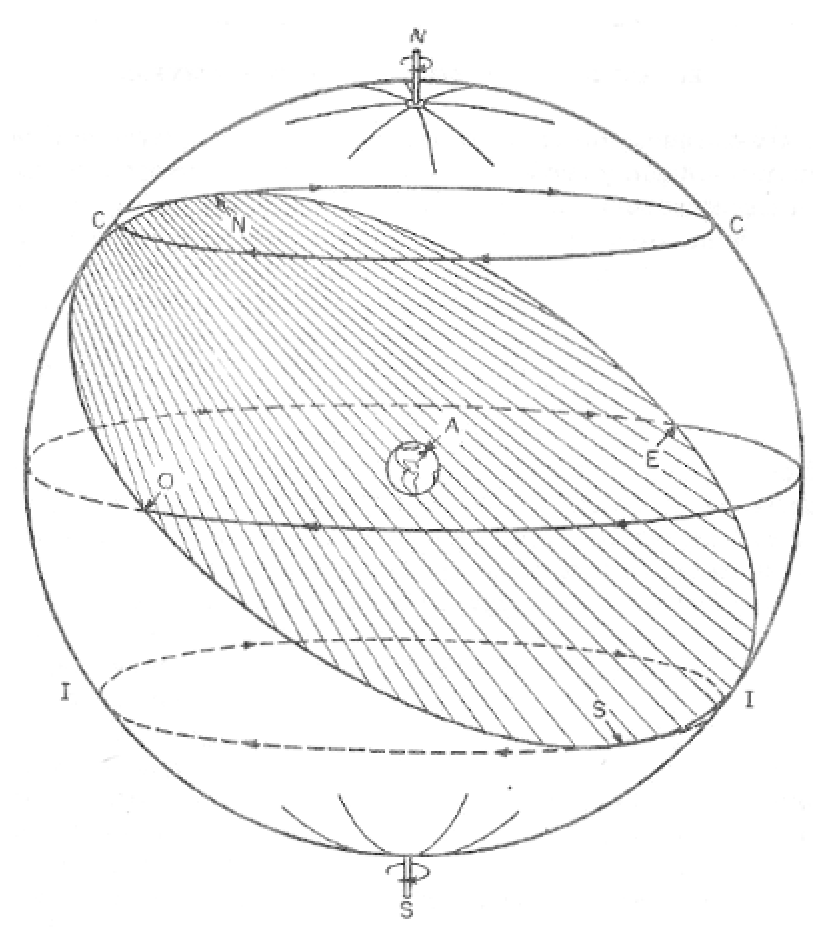


FIGURA 11. — Funciones astronómicas del universo de las dos esferas. El círculo exterior es una sección recta de la esfera estelar que gira regularmente de oeste a este alrededor del eje *NS*. El observador situado en el punto *A* puede ver toda la parte de la esfera situada por encima del plano de horizonte *SONE*, rayado en el diagrama. Si este esquema estuviera dibujado a escala, la tierra tendría unas dimensiones mucho más reducidas y el plano de horizonte sería tangente a la tierra en el punto de observación *A*. Pero un dibujo a escala reduciría la tierra a dimensiones minúsculas, razón por la cual se ha representado aquí el plano de horizonte pasando por el centro de la esfera estelar a la vez que se preserva su orientación verdadera con respecto al observador al mantenerlo perpendicular a la linea que une el punto *A* con el centro de la tierra.

Los círculos horizontales son las trayectorias seguidas por puntos particulares de la esfera durante su rotación cotidiana. Tales círculos diarios de determinadas estrellas se han representado en trazo continuo mientras son visibles para el observador y en trazo discontinuo cuando están situadas por debajo de su horizonte. El círculo central es el trazado por una estrella situada sobre el ecuador celeste; ésta sale por *E*, el este exacto del observador, se eleva a lo largo de una linea oblicua inclinada hacia el sur, y así sucesivamente. Los círculos superior e inferior son los de dos estrellas que se encuentran con el horizonte sólo en un punto. El círculo superior, *CC*, es el círculo cotidiano de la estrella circumpolar más meridional. El circulo inferior, *II*, es el trazado por la estrella más septentrional de las visibles para el observador situado en *A*.

Para un observador situado en *A*, los objetos muy próximos al punto *N* de la esfera exterior parecen girar con gran lentitud describiendo círculos alrededor del polo; si la esfera gira sobre sí misma una vuelta completa cada 23 horas 56 minutos, dichos objetos completan sus círculos en idéntico período que las estrellas; representan pues, en nuestro modelo, las estrellas. Todas las estrellas suficientemente próximas al polo como para hallarse situadas por encima del círculo *CC* del diagrama son circumpolares, pues la rotación de la esfera no las hace descender jamás por debajo de la línea del horizonte. Las estrellas situadas entre los círculos *CC* e *II* salen y se ponen formando un ángulo distinto con respecto a la línea del horizonte en cada una de las rotaciones de la esfera; las más próximas al círculo *II* apenas si se elevan por encima del horizonte sur y sólo son visibles durante un breve lapso de tiempo. Finalmente, las estrellas situadas por debajo del círculo *II* y cercanas al punto *S* jamás aparecen ante la vista de un observador situado en *A*, pues se las oculta su propio horizonte. Sin embargo, estas últimas serían visibles para observadores que estuvieran situados en otros puntos de la esfera interior. *S* es un segundo punto fijo del cielo, un segundo polo, potencialmente visible. Se le designa con el nombre de polo sur celeste, mientras que el punto *N*, visible, es el polo norte celeste.

Si el observador de la figura 11 deja el punto *A* y se desplaza hacia el norte (hacia un punto de la tierra situado justamente bajo el polo norte celeste), su plano de horizonte le sigue en el desplazamiento y tiende a situarse perpendicularmente al eje de la esfera de las estrellas a medida que el observador se aproxima al polo norte terrestre. Puesto que el observador se desplaza hacia el norte, el polo celeste parece alejarse cada vez más y más del punto que señala el norte sobre el horizonte, hasta que finalmente se sitúa justo por encima de la cabeza del observador. Simultáneamente, el círculo *CC*, siempre tangente al punto situado más al norte sobre el horizonte, desciende y se amplía de tal forma que cada vez se convierten en circumpolares un mayor número de estrellas. Pero cuando el observador se desplaza hacia el norte también se amplía paulatinamente el círculo *II* y, consecuentemente, va en aumento el número de estrellas que desaparecen de su campo de visión. Si el observador se desplaza hacia el sur, el efecto es

exactamente el inverso, es decir, el polo norte celeste se aproxima cada vez de forma más acusada al punto situado más al norte sobre el horizonte y los círculos *CC* e *II* se reducen hasta confundirse con los polos celestes norte y sur respectivamente una vez el observador ha llegado al ecuador. La figura 12 nos muestra los dos casos límites, el observador situado sobre el polo norte terrestre y el observador situado sobre el ecuador terrestre. En el primer caso, el horizonte aparece en posición horizontal y el polo norte celeste está precisamente sobre la cabeza del observador; las estrellas de la mitad superior de la esfera celeste describen con regularidad círculos paralelos al horizonte y las estrellas del hemisferio inferior son invisibles en todo momento. En el segundo caso, el horizonte se nos muestra vertical; los polos celestes norte y sur se hallan sobre los puntos norte y sur del horizonte; todas las estrellas pueden ser observadas en un momento u otro, pero no puede verse más que un semicírculo de la trayectoria de cualquiera de ellas.

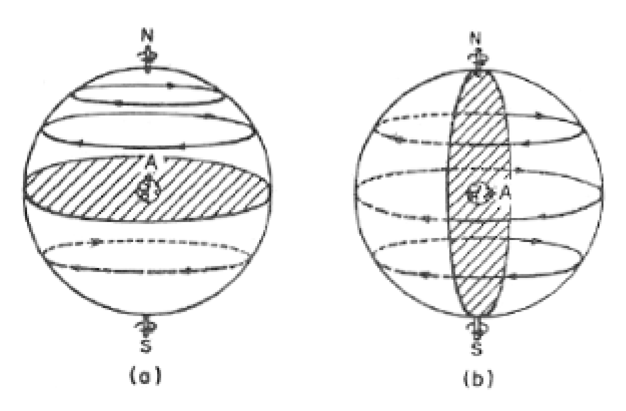


FIGURA 12. — Movimientos estelares en el universo de las dos esferas tal como son vistos por un observador situado en el polo norte terrestre (*a*) y en el ecuador (*b*).

Si exceptuamos estos casos extremos, no observados por los astrónomos de la antigüedad, el movimiento de las estrellas en el modelo de las dos esferas coincide de forma notablemente precisa con las observaciones de las estrellas reales discutidas en páginas anteriores. No puede existir otro argumento más convincente en favor de la cosmología de las dos esferas.

EL SOL EN EL UNIVERSO DE LAS DOS ESFERAS

Una discusión completa del movimiento del sol en el marco del universo de las dos esferas exige un desarrollo de dicha cosmología en el que se contemple la especial posición ocupada por aquél, situado entre la esfera central fija, la tierra, y la esfera periférica en rotación, la de las estrellas. Dicha elaboración forma parte de un problema más general, el de los planetas, aspecto que consideraremos dentro del capítulo siguiente. Sin embargo, el esqueleto cosmológico descrito en páginas anteriores permite ya establecer, aunque de forma muy simplificada, una descripción del movimiento aparente del sol. Visto desde la tierra como una proyección sobre la superficie de la esfera de las estrellas, el movimiento del sol adquiere una regularidad que no poseía antes de que las estrellas fueran localizadas sobre una esfera en rotación cuyo centro estuviera ocupado por la tierra.

La nueva simplicidad del movimiento aparente del sol nos viene descrita por la figura 13. Esta figura representa un esbozo de la esfera de las estrellas, de la que es visible el polo norte y en la que la rotación diurna hacia el oeste viene indicada por una flecha que gira alrededor del eje que pasa por los polos. A igual distancia de los polos celestes norte y sur se ha representado el ecuador celeste, círculo máximo sobre el que se hallan situadas todas las estrellas (y todos los puntos de la esfera) que salen y se ponen exactamente por el este y el oeste exactos. Un círculo máximo es la más simple de todas las curvas que pueden trazarse sobre la superficie de una esfera —se trata de la intersección entre la superficie de la esfera y un plano cualquiera que pase por su centro— y la nueva simplificación del movimiento aparente del sol resulta del hecho de que sobre una esfera celeste la eclíptica no es más que un círculo máximo que divide la esfera en dos mitades iguales. Sobre la figura 13, la eclíptica es el círculo máximo inclinado que corta al ecuador celeste según un ángulo de 23 ½° en dos puntos diametralmente opuestos. Todos los puntos en los que un observador terrestre puede ver el centro del sol en proyección sobre la esfera de las estrellas se encuentran sobre la eclíptica. En todo instante, el centro del sol es un punto perteneciente a dicho círculo máximo y participa del movimiento diurno hacia el oeste que anima a toda la esfera, pero

simultáneamente el sol se desplaza con lentitud hacia el este (en el sentido que señalan las flechas de la figura 13) para cumplimentar cada año su revolución a lo largo de la eclíptica.

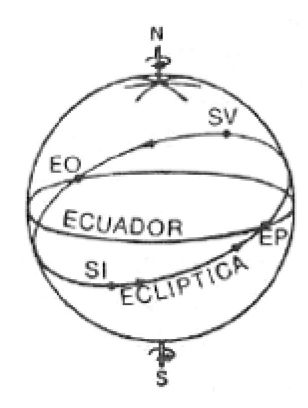


FIGURA 13. — El ecuador y la eclíptica sobre la esfera celeste.

Puesto que durante todo período de 24 horas el sol parece hallarse casi inmóvil sobre la eclíptica, cada día describe un círculo diurno muy semejante al de una estrella. Sin embargo, el sol se desplaza lentamente hacia el este con respecto a la esfera estelar mientras ésta gira a gran velocidad en dirección contraria, con lo que se ve obligado a recorrer su círculo diurno algo más despacio que las estrellas y es “doblado” por éstas en su trayectoria una vez cada año. Dicho con mayor precisión, puesto que el sol debe recorrer 360° para dar una vuelta completa a la eclíptica y que dicho trayecto le lleva poco más de 365 días, su movimiento hacia el este a lo largo de la eclíptica es de algo menos de 1° diario (dicho resultado se muestra como fruto de la observación en la figura 9), la distancia angular que pierde el sol cada día con respecto a las estrellas. Por otro lado, dado que la longitud del día viene definida por el movimiento diurno del sol y que las estrellas, al desplazarse 15° cada hora o 1° cada cuatro minutos, toman 1° de ventaja al sol en su trayectoria común cada día que pasa, una estrella que, por ejemplo, se encontrara sobre nuestra cabeza en la medianoche de un día determinado, completaría su movimiento diurno y volvería a ocupar el mismo punto sobre el cielo exactamente 4 minutos antes de la medianoche del siguiente día. Una vez más nos encontramos con que un detalle sobre el comportamiento de los cielos, que inicialmente se

presenta como un hecho de observación entre muchos otros (cf. pp. 31-32), se ha convertido en parte integrante de un esquema coherente en el universo de las dos esferas.

Un orden semejante aparece en las posiciones ocupadas por los solsticios y los equinoccios sobre la esfera de las estrellas. Los dos equinoccios ocupan los puntos diametralmente opuestos de la esfera estelar en los que la eclíptica corta al ecuador celeste. Éstos son los únicos puntos de la eclíptica que siempre salen y se ponen por el este y el oeste exactos. De forma similar, los dos solsticios deben corresponder a puntos de la eclíptica equidistantes de los dos equinoccios, pues son los puntos de la eclíptica que se hallan más al norte y al sur del ecuador celeste. Cuando el sol se halla sobre alguno de estos dos puntos, sale más al norte (o al sur) del este verdadero que en cualquier otra época del año. Puesto que el sol se desplaza regularmente hacia el este, desde el solsticio de verano al equinoccio de otoño, los puntos equinocciales y solsticiales son fácilmente identificables sobre la esfera celeste. En la figura 13 se hallan representados todos ellos sobre la eclíptica. Una vez trazada la eclíptica y marcados dichos puntos, si construimos un plano de horizonte apropiado dentro de la esfera estelar no hay problema alguno en descubrir cómo varía el comportamiento del sol a lo largo del año cuando es observado desde cualquier lugar de la tierra. En la figura 14 se hallan representados tres ejemplos particularmente significativos del movimiento del sol durante las diferentes estaciones anuales establecidos a partir del modelo de las dos esferas. En tales diagramas empieza a mostrársenos de forma patente toda la fuerza del esquema conceptual que venimos discutiendo.

LAS FUNCIONES DE UN ESQUEMA CONCEPTUAL

A diferencia de cuanto atañe a las observaciones descritas en anteriores secciones de este capítulo, el universo de las dos esferas es un producto de la imaginación humana. Se trata de un esquema conceptual, una teoría desarrollada a partir de las observaciones y que, a un mismo tiempo, las

trasciende. La cosmología de las dos esferas no es un *corpus* teórico acabado puesto que no nos da razón de los movimientos de todos los cuerpos celestes (en particular, nada nos dice de los planetas, a los que hasta el momento presente hemos dejado absolutamente de lado), pero proporciona ya ejemplos concluyentes de algunas de las funciones, tanto lógicas como psicológicas, que pueden desempeñar las teorías científicas para los hombres que las desarrollan o hacen uso de ellas. La evolución de todo esquema conceptual científico, astronómico o no, depende del modo en que cumple tales funciones. Antes de profundizar a lo largo de los dos capítulos siguientes en el universo de las dos esferas, intentaremos explicitar algunas de ellas para iluminar ya desde ahora algunos de los problemas más fundamentales que surgirán a lo largo de este estudio sobre la revolución copernicana.

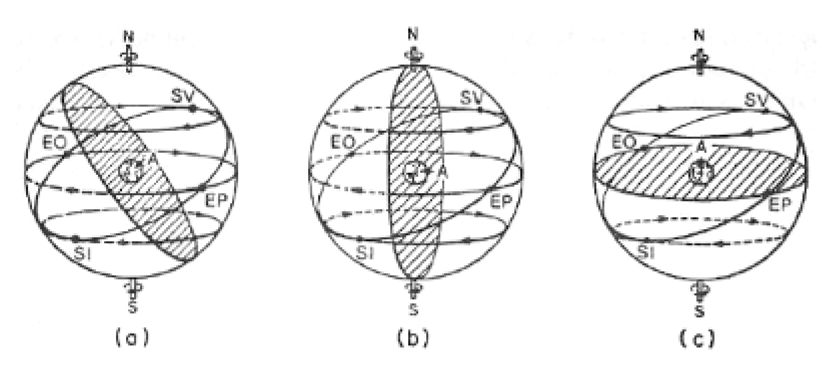


FIGURA 14. — El movimiento del sol observado desde diferentes lugares de la tierra. (*a*) Observador situado en latitudes boreales medias: En el solsticio de verano el sol se eleva muy al norte del este exacto y a lo largo de una linea oblicua; más de la mitad de su circulo diario está situado por encima del horizonte, con lo que los días son más largos que las noches. En los equinoccios el sol sale por el este exacto y sólo es visible durante la mitad de su circulo diario. En el solsticio de invierno se eleva muy hacia el sur del este exacto y los días son más cortos que las noches. La elevación cotidiana máxima del sol por encima del horizonte es mayor durante los días de verano, pero sea cual sea la estación del año, las sombras que produce al mediodía siempre están dirigidas hacia el norte exacto. (*b*) Observador situado en el ecuador: Sea cual sea la localización del sol sobre la eclíptica, el plano de horizonte divide el círculo diario del sol en dos partes iguales. Noches y días tienen siempre idéntica duración, y las variaciones climáticas estacionales son escasas. Durante la mitad del año comprendida entre el equinoccio de primavera y el equinoccio de otoño, el sol se eleva al norte del punto este exacto y las sombras al mediodía están dirigidas hacia el sur exacto. Durante la otra mitad, sale al sur del punto este exacto y las sombras al mediodía están dirigidas hacia el norte, (*c*) Observador situado en el polo norte terrestre: La mitad de la eclíptica siempre permanece por debajo del horizonte, y por consiguiente el sol le es completamente invisible durante la mitad del año que va desde el equinoccio de otoño al de primavera. En el equinoccio

vernal comienza a despuntar por encima del horizonte, y en su movimiento cotidiano va elevándose progresivamente siguiendo una espiral hasta llegar al solsticio de verano. A partir de aquí, el sol empieza a descender gradualmente también en espiral, hasta que acaba por desaparecer bajo el horizonte al alcanzar el equinoccio de otoño. Entre el equinoccio de primavera y el de otoño el sol no se pone jamás.

La característica más sorprendente del universo de las dos esferas es quizá la ayuda que presta a la memoria del astrónomo. Tal característica de un esquema conceptual a menudo recibe el nombre de economía conceptual. Las observaciones del sol y de las estrellas de que hemos hablado en secciones precedentes, si bien han sido seleccionadas con todo cuidado y presentadas de forma sistemática, fueron, en tanto que conjunto, extremadamente complejas. Para un hombre que no posea previamente buenos conocimientos sobre el cielo, observar la dirección que toma la línea oblicua a lo largo de la cual se eleva el sol o el comportamiento de la sombra del gnomon no le impulsa a establecer conexiones claras y definidas con otras observaciones distintas, como puedan ser, por ejemplo, la localización del polo celeste o la breve aparición de las estrellas en los cielos australes. Cada observación es una pieza aislada en una larga lista de hechos brutos que hacen referencia a los cielos y, en un instante dado, es sumamente difícil, por no decir imposible, tener presente en la memoria la lista completa de los mismos.

El universo de las dos esferas no plantea tales problemas: una esfera gigante en la que se hallan engarzadas las estrellas gira regularmente hacia el oeste alrededor de un eje fijo cada 23 horas 56 minutos; la eclíptica es un círculo máximo de esta esfera inclinado 23° y medio con respecto al ecuador celeste y el sol se desplaza regularmente hacia el este a lo largo de la eclíptica, completando una vuelta cada 365 días y cuarto; el sol y las estrellas son observados desde una esfera minúscula y fija situada en el centro de la gran esfera estelar. Confiado este conjunto de datos a la memoria de una vez por todas, puede olvidarse por completo la lista de observaciones a condición de recordar estas pocas premisas. El modelo reemplaza a la lista porque, tal como hemos visto, las observaciones pueden derivarse del modelo. En muchos casos ni es necesario, pues quien observe

el cielo teniendo presente el modelo de las dos esferas descubrirá que el esquema conceptual revela un cañamazo al que pueden ser adaptadas observaciones desvinculadas entre sí. También descubrirá que la lista de observaciones se convierte por primera vez en un todo coherente, y que de este modo es mucho más fácil recordar los diversos elementos de dicha lista. Si no gozara de los resúmenes ordenados que le proporcionan sus teorías, la ciencia sería incapaz de acumular tan inmensas masas de detalladas informaciones sobre la naturaleza.

El universo de las dos esferas aún es utilizado ampliamente en nuestros días dada su capacidad de proporcionar un compacto resumen sintético de una vasta cantidad de importantes hechos de observación. La teoría y la práctica de la navegación y de la topografía pueden ser expuestas con gran simpleza y precisión a partir de modelos construidos sobre los elementos de la figura 11. Por otra parte, puesto que el modelo empleado por la moderna astronomía es mucho más complejo, habitualmente se prefiere como marco de referencia para enseñar las materias que nos ocupan el universo de las dos esferas frente al universo copernicano. La mayor parte de los manuales de navegación o de topografía vienen encabezados por una frase similar a ésta: “Para nuestros objetivos presentes, supondremos que la tierra es una pequeña esfera inmóvil cuyo centro coincide con el de una esfera estelar, mucho más grande, y animada de un movimiento de rotación”. Así pues, evaluado en términos de economía, el universo de las dos esferas continúa siendo lo que siempre ha sido, una teoría en extremo afortunada.

Sin embargo, en otros aspectos, desde la revolución copernicana el universo de las dos esferas ha dejado de ser tan satisfactorio como era en épocas pretéritas. Si ha seguido manteniendo su carácter económico es sólo porque la economía es una función puramente lógica. Las observaciones celestes conocidas por los antiguos astrónomos y utilizadas por los navegantes modernos son consecuencias lógicas del modelo de las dos esferas, represente o no para ellos dicho modelo la realidad. La actitud del científico, su fe en la “verdad” del esquema conceptual, no afecta para nada a las posibilidades lógicas del esquema para proporcionar un compendio económico. No obstante, además de funciones lógicas, los esquemas

conceptuales también desempeñan una serie de funciones psicológicas y éstas sí dependen de las creencias o incredulidades del científico. Por ejemplo, la necesidad psicológica de tranquilidad, de la que ya se ha hablado en la segunda sección del presente capítulo, sólo puede ser satisfecha por un cierto esquema conceptual si éste ha sido pensado como algo más que un medio cómodo de reunir y resumir lo ya conocido. Tal fue la actitud mantenida a lo largo de la antigüedad, y resurgida a finales de la Edad Media entre los pueblos europeos, frente a la concepción del universo de las dos esferas. Todo el mundo, científicos o no, creían que las estrellas eran realmente una serie de puntos brillantes situados sobre una esfera gigantesca que englobaba simétricamente el habitáculo terrestre del hombre. Como resultado, la cosmología de las dos esferas proporcionó durante siglos a la mayor parte de los hombres una determinada visión del mundo en la que se precisaba su lugar dentro de la creación y se daba un significado físico a su relación con los dioses. Tal como veremos a lo largo de los capítulos 3 y 4, un esquema conceptual en el que se cree, y que por ende funciona como parte de una cosmología, tiene algo más que un significado científico.

La creencia también repercute en el funcionamiento de los esquemas conceptuales dentro del ámbito científico. La economía, como función puramente lógica, y la satisfacción cosmológica, como función puramente psicológica, son algo así como los dos extremos de un espectro. Entre dichos límites existe toda una serie de funciones significativas que dependen, a un mismo tiempo, de la estructura lógica de la teoría, de su atractivo psicológico y de su aptitud para evocar la creencia. Por ejemplo, un astrónomo que crea en el universo de las dos esferas, encontrará que dicha teoría, no sólo resume cómodamente los hechos observados, sino que, además, los *explica*, permitiéndole *comprender* por qué son lo que son. Palabras tales como "explicar" y "comprender" parecen referirse simultáneamente a los aspectos lógicos y psicológicos de los esquemas conceptuales. Desde el punto de vista lógico, el universo de las dos esferas explica los movimientos de las estrellas porque pueden ser deducidos de un modelo que es, con mucho, el más simple posible. La complejidad se hace

mínima, y una tal reducción lógica es una de las componentes esenciales de la explicación, aunque no la única. Desde el punto de vista psicológico, el universo de las dos esferas no aporta explicación alguna, a menos que se considere que es el modelo verdadero. El navegante moderno se sirve del universo de las dos esferas, pero no pretende explicar los movimientos estelares a partir de una supuesta rotación de la esfera exterior. Por el contrario, cree que el movimiento diurno de las estrellas es un simple movimiento aparente y, en consecuencia, lo interpretará como el resultado de la rotación real de la tierra.

El hecho de que el científico utilice tal o cual esquema conceptual en sus explicaciones es un índice de hasta qué punto confía en él, es una muestra de su convicción de que el modelo que emplea es el único válido. Tal tipo de adhesión o creencia es siempre temeraria, ya que ni la economía ni la satisfacción que pueda producir el orden cosmológico pueden garantizar en modo alguno la verdad, sea cual sea el sentido asignado a dicho término. La historia de la ciencia está llena de ejemplos de esquemas conceptuales en los que se ha creído de forma fervorosa hasta que fueron reemplazados por otras teorías incompatibles con ellos. No hay forma posible de probar que un esquema conceptual es definitivo. Sin embargo, temeraria o no, la adhesión a un determinado esquema conceptual es un fenómeno común en el campo científico que, a un mismo tiempo, parece de todo punto indispensable, pues dota a dichos esquemas de una función nueva y de la más alta importancia. Los esquemas conceptuales son comprensibles y sus consecuencias no se limitan a explicar lo que ya nos es conocido. Por ejemplo, un astrónomo que crea en el universo de las dos esferas esperará que la naturaleza le muestre una serie de propiedades adicionales, inobservadas hasta aquel momento, pero predichas por el esquema. Para él la teoría trascenderá lo conocido, convirtiéndose ante todo en un potente medio para prever y explorar lo desconocido. Dicho de otro modo, influirá sobre el futuro de la ciencia tanto como lo ha hecho sobre su pasado.

El universo de las dos esferas habla al científico del comportamiento del sol y de las estrellas en regiones de la tierra (como el hemisferio austral o

los polos terrestres) a las que jamás se ha trasladado. Además, le informa acerca del movimiento de estrellas que nunca ha observado sistemáticamente; dado que dichas estrellas también se hallan engarzadas en la esfera estelar, deben describir círculos diurnos similares a los de otras estrellas. Se trata de un nuevo conocimiento, que con el tiempo puede tener considerables consecuencias, derivado, en un principio, no de la observación, sino directamente del esquema conceptual. Por ejemplo, la cosmología de las dos esferas enseña que la tierra tiene una circunferencia y sugiere una serie de observaciones (discutidas en la sección cuarta del Apéndice técnico) a través de las que el astrónomo puede descubrir sus dimensiones. Fue un conjunto de tales observaciones (poco exactas, pues a partir de ellas se determinaron unas dimensiones bastante inferiores a las reales) el que condujo a Cristóbal Colón a pensar que la navegación alrededor del globo era una empresa perfectamente realizable. Los viajes de Colón, así como los ulteriores de Magallanes y de otros navegantes, proporcionaron evidencias observacionales a convicciones que hasta entonces sólo se derivaban del esquema teórico y enriquecieron el edificio científico con una serie de observaciones absolutamente nuevas e insospechadas. Tales travesías nunca hubieran sido emprendidas, ni las nuevas observaciones que de ellas derivaron habrían enriquecido las ciencias, sin un esquema conceptual que mostrara previamente el camino a seguir.

Los viajes de Cristóbal Colón son un buen ejemplo de la fecundidad de un esquema conceptual. Muestran con toda claridad cómo las teorías pueden guiar a un científico a través de un terreno aún desconocido, indicándole hacia dónde debe centrar su atención y con qué puede esperar encontrarse. Quizá sea ésta la función más importante que tienen los esquemas conceptuales dentro de la ciencia. Sin embargo, raras veces guían la búsqueda de forma tan clara y directa como en el ejemplo que estamos evocando. Generalmente, el esquema conceptual proporciona sugerencias para organizar la investigación en vez de dar directivas explícitas sobre la misma, y la prosecución de tales sugerencias obliga la mayor parte de las veces a una ampliación o modificación del esquema conceptual inicial. Por

ejemplo, en un principio, la función del universo de las dos esferas fue explicar los movimientos diurnos de las estrellas y la forma en que varían los mismos según el lugar desde donde son observados. Pero una vez desarrollada, la nueva teoría también se reveló apta para ordenar y simplificar todas las observaciones relativas al movimiento solar. Como consecuencia, una vez puesta de manifiesto la insospechada regularidad del complejo comportamiento del sol, el esquema conceptual proporcionó un adecuado marco en el que estudiar los movimientos, aún más irregulares, de los planetas. Este último problema había sido considerado como insoluble hasta que fue conocido y ordenado el movimiento general de los cielos.

La mayor parte del presente libro se dedica a estudiar la fecundidad de algunos esquemas conceptuales en particular; es decir, su eficacia como pautas que guíen la investigación y como marcos de referencia en cuyo seno integrar los nuevos conocimientos adquiridos. En particular, dentro de los dos próximos capítulos, se examinará el papel del universo de las dos esferas en la primitiva solución dada, en primer lugar, al problema de los planetas, y después, a ciertos problemas absolutamente al margen de la propia astronomía. Más adelante descubriremos cuán diferente fue el papel de la nueva concepción copernicana, basada en una tierra planetaria en movimiento, como guía de la investigación científica posterior. Sin embargo, lo que mejor puede ilustrar la fecundidad de la aportación de Copérnico es la historia relatada a lo largo de la totalidad de la obra. El propio universo copernicano es el producto de una serie de investigaciones llevadas a cabo gracias a la preexistencia del modelo de las dos esferas, siendo la concepción de la tierra como planeta la mejor ilustración que hallarse pueda de la vigente orientación que ha tomado la ciencia. Por tal motivo, creemos que la discusión de la revolución copernicana debe arrancar de un estudio de la cosmología de las dos esferas, que el mismo copernicanismo convirtió, al fin, en obsoleta. Este universo es antecesor del copernicano; no hay ningún esquema conceptual que nazca de la nada.

LAS ANTIGUAS COSMOLOGÍAS RIVALES DEL UNIVERSO DE LAS DOS ESFERAS

La concepción de un universo constituido por dos esferas no fue la única cosmología propuesta en la antigua Grecia, aunque sí la más seriamente considerada por la mayor parte de la gente, en especial por los astrónomos, y la primera que con el correr del tiempo iba a heredar la civilización occidental. No obstante, algunas de las cosmologías rivales propuestas, y dejadas de lado durante la antigüedad, presentan semejanzas mucho más acusadas con la cosmología moderna que las que muestra el universo de las dos esferas. Nada ilustra con mayor claridad la fuerza de la cosmología de las dos esferas ni deja entrever de forma más nítida las dificultades que debieron vencerse para acabar rechazándola que una comparación entre su esquema y el de algunas de las cosmologías rivales superficialmente más modernas.

Ya en el siglo V antes de nuestra era, los atomistas griegos Leucipo y Demócrito veían el universo como un espacio infinito y vacío en el que pululaban un número infinito de partículas minúsculas e indivisibles, los átomos, desplazándose en todos los sentidos. Dentro de dicho universo, la tierra era uno más entre los cuerpos celestes, todos semejantes en cuanto a sus características esenciales, que se habían formado aleatoriamente a través de los choques y agrupaciones de átomos. No era única, no estaba en reposo, no era el centro del universo. De hecho, un universo infinito no tiene centro, y cualquier región del espacio es como las restantes. En consecuencia, el infinito número de átomos que poblaban el espacio, algunos de los cuales se agruparon para conformar nuestra tierra y nuestro sol, podían haber constituido otros numerosos mundos en distintas regiones del espacio vacío. Existían pues, para los atomistas, otros soles y otras tierras entre las estrellas.

Posteriormente, también dentro del siglo V antes de nuestra era, los discípulos de Pitágoras propusieron una nueva cosmología en la que se atribuía a la tierra un movimiento y se la privaba parcialmente de su estatuto privilegiado. Los pitagóricos situaban las estrellas sobre una esfera

gigante en movimiento, pero en su centro colocaban un inmenso fuego, el Altar de Zeus, invisible desde la tierra. Nadie podía ver dicho fuego, pues las regiones habitadas de nuestro planeta jamás estaban dirigidas hacia él. Para los pitagóricos, la tierra no era más que un cuerpo celeste entre muchos otros, incluido el sol, todos ellos moviéndose según círculos alrededor del fuego central. Un siglo más tarde, Heráclides del Ponto (siglo IV antes de nuestra era) sugirió que el movimiento de los cielos era debido a la rotación diaria de la tierra sobre sí misma en vez de a un movimiento de rotación de la esfera de las estrellas: también destruyó la simetría del universo de las dos esferas al suponer que los planetas Venus y Mercurio, en lugar de describir órbitas circulares independientes alrededor de la tierra central (cf. capítulo 2), lo que hacían era describir círculos alrededor del sol, dotado asimismo de movimiento. Más tarde aún, a mediados del siglo III antes de nuestra era, Aristarco de Samos, cuyas ingeniosas y fundamentales determinaciones de las distancias astronómicas son descritas en el Apéndice técnico, emitió la hipótesis que le ha valido ser considerado como el "Copérnico de la antigüedad". Para Aristarco, el sol estaba en el centro de una inmensa esfera estelar y la tierra describía una órbita circular a su alrededor.

Todas estas cosmologías rivales, en especial las descritas en primer y último lugar, son notablemente próximas a nuestros modernos conceptos sobre el universo. En efecto, en nuestros días creemos que la tierra no es más que un planeta entre otros girando alrededor del sol y que, por su parte, el sol es una estrella entre una multitud de estrellas semejantes, muchas de las cuales tienen sus propios planetas. Sin embargo, aunque en la antigüedad algunas de las especulaciones indicadas dieran nacimiento a tradiciones minoritarias y todas ellas constituyeran un permanente estímulo intelectual para innovadores posteriores tales como Copérnico, cabe recordar que, en sus orígenes, ninguna de dichas teorías fue sostenida mediante las argumentaciones que hacen que en la actualidad creamos en ellas. En ausencia de tales argumentos, no es de extrañar que fueran rechazadas por la mayor parte de los filósofos y por casi todos los astrónomos del mundo antiguo. Durante la Edad Media eran ridiculizadas o,

simplemente, se las ignoraba. De hecho, existían excelentes razones para rechazarlas. Por un lado, dichas alternativas cosmológicas violan las primeras y más fundamentales sugerencias que nos proporcionan los sentidos acerca de la estructura del universo; además, este desacuerdo con el sentido común no se ve compensado por resultados que den cuenta de las apariencias de forma mucho más efectiva y creadora. Por fin, dichas teorías no son ni más económicas, ni más fecundas o precisas que el universo de las dos esferas, mientras que, en contrapartida, se hace mucho más difícil creer en su veracidad. En consecuencia, era realmente difícil que se las tomara en consideración de una forma seria.

Todas las cosmologías que rivalizaban con el universo de las dos esferas tomaban como premisa el movimiento de la tierra, y todas (excepto la de Heráclito) admiten que la tierra está en movimiento como un cuerpo celeste entre muchos otros. Sin embargo, la primera distinción sugerida por los sentidos es la separación existente entre el cielo y la tierra. La tierra no forma parte del cielo, sino que es la plataforma desde la que lo observamos. Aparentemente, dicha plataforma presenta pocos, por no decir ninguno, rasgos comunes con el resto de cuerpos celestes que nos es dado ver. Los cuerpos celestes semejan puntos luminosos muy brillantes, mientras que la tierra es una esfera inmensa, fangosa y rocosa. Pocos cambios se observan en el cielo. Las estrellas son las mismas noche tras noche, y así parece que haya sido desde los tiempos más lejanos de los que guardamos algún testimonio documental. Por el contrario, la tierra es la sede del nacimiento, el cambio y la destrucción. La fauna y la flora se ven sometidas a continuas transformaciones; las civilizaciones se suceden con el paso de los siglos; las leyendas dan testimonios de los más lentos cambios topográficos causados por tempestades e inundaciones. Parece, pues, absurdo equiparar la tierra a un cuerpo celeste, cuya característica esencial es esta inmutable regularidad que jamás podrá ser alcanzada sobre nuestro corruptible globo.

La idea de que la tierra se mueve parece *a priori* igualmente absurda. Nuestros sentidos nos enseñan todo cuanto sabemos acerca del movimiento, y por cierto no nos indican en modo alguno que la tierra se esté moviendo. Antes de ser reeducado, el sentido común nos dice que si la tierra está en

movimiento, el aire, las nubes, los pájaros, en pocas palabras, todo aquello no solidario con ella, debería quedar atrás. Al saltar, un hombre debería caer lejos de su punto de partida, ya que la tierra se ha movido bajo sus pies mientras él volaba por los aires. Árboles y rocas, hombres y animales, se verían arrojados por una tierra en rotación de forma similar a como una honda arroja las piedras. Puesto que no se observa ninguno de los efectos apuntados, la tierra está en reposo. Observación y raciocinio se combinan para probárnoslo.

Actualmente, en el mundo occidental, los niños son los únicos que emplean tales argumentaciones, los únicos que creen que la tierra está en reposo. A temprana edad, la autoridad de educadores y padres, así como la de los textos, les persuade de que la tierra es un planeta en movimiento. De esta forma su sentido común sufre una reeducación, y los argumentos nacidos de la experiencia cotidiana pierden su antigua fuerza como pruebas de experiencia concluyentes. Pero nótese que la reeducación es esencial — en su ausencia los argumentos expuestos tienen un enorme poder persuasivo — y que las autoridades pedagógicas que tanto nosotros como nuestros hijos aceptamos no existían en la antigüedad. Los griegos sólo podían fiarse de la observación y de la razón, y ni una ni otra aportaba evidencia alguna sobre el movimiento de la tierra. Sin la ayuda de telescopios o de elaboradas argumentaciones matemáticas, que no parecen tener vínculo alguno con la astronomía, no es posible dar una prueba irrefutable del movimiento de la tierra. Por el contrario, las observaciones efectuadas a simple vista, es decir, sin ninguna ayuda instrumental, están en perfecta concordancia con el universo de las dos esferas (recuérdese lo dicho respecto al universo del navegante y el topógrafo), y no existe explicación más natural para las mismas. No es pues demasiado difícil comprender qué motivos impulsaban a nuestros antepasados a creer en el universo de las dos esferas. Se nos plantea ahora el problema de descubrir por qué fue abandonada dicha concepción.

Capítulo 2

EL PROBLEMA DE LOS PLANETAS

EL MOVIMIENTO APARENTE DE LOS PLANETAS

Si el sol y las estrellas fueran los únicos cuerpos celestes visibles a simple vista, el hombre moderno aún podría seguir admitiendo los dogmas fundamentales del universo de las dos esferas. Sin lugar a dudas, parece correcto suponer que muy bien podría haber seguido admitiéndolos hasta el descubrimiento del telescopio, efectuado más de medio siglo después de la muerte de Copérnico. Sin embargo, existen otros cuerpos celestes notables, en particular los planetas, y el interés del astrónomo por los mismos fue la principal fuente de la revolución copernicana. Una vez más, consideraremos las observaciones estrictas antes de explicarlas dentro de un marco interpretativo. Una vez más, el conflicto entre diversas interpretaciones nos situará ante un problema nuevo y fundamental de la anatomía de la creencia científica.

La palabra planeta deriva de un término griego que significa “vagabundo”, expresión empleada aún en épocas posteriores a Copérnico para distinguir los cuerpos celestes dotados de movimiento o que “vagabundeaban” entre las estrellas de aquellos que mantenían fijas sus posiciones relativas. Para los griegos, y para sus sucesores, el sol era uno de los siete planetas. Los restantes eran la luna, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Las estrellas y estos siete planetas eran los únicos cuerpos celestes conocidos en la antigüedad. Ningún nuevo planeta fue descubierto hasta 1781, es decir, mucho tiempo después de haber sido aceptada la teoría

copernicana. Los cometas, bien conocidos ya en la antigüedad, no fueron considerados como cuerpos celestes hasta el advenimiento de la revolución copernicana (capitulo 6).

Todos los planetas tienen un comportamiento comparable al del sol, aunque por lo general su movimiento es algo más complejo. Todos ellos gozan de un movimiento diurno hacia el oeste, en el que acompañan a las estrellas, al tiempo que se desplazan con lentitud hacia el este, a través de éstas, hasta retornar aproximadamente a su posición de origen. Durante su movimiento, todos los planetas se mantienen relativamente próximos a la eclíptica, en ocasiones algo al norte de ella y en otras algo al sur, pero raras veces abandonan la banda del zodíaco, esta zona imaginaria del cielo que se extiende alrededor de unos 8° a cada uno de ambos lados de la eclíptica. Éstas son todas las semejanzas entre los planetas y aquí comienza el estudio de sus irregularidades.

La luna recorre la eclíptica más rápidamente y con menos regularidad que el sol. Emplea por término medio 27 días y un tercio para dar una vuelta completa a través del zodíaco, tiempo de revolución que puede diferir hasta en 7 horas del valor medio estimado. Por otro lado, el aspecto del disco de la luna varia de forma sumamente visible a lo largo de su recorrido. En luna nueva, el disco es completamente invisible o bien se nos muestra muy pálido; acto seguido aparece un delgado arco muy brillante, que va creciendo paulatinamente hasta convertirse en un semicírculo, aproximadamente una semana después de la luna nueva. Más o menos dos semanas después de la luna nueva se hace visible el disco completo; a continuación el ciclo de las fases se invierte y la luna decrece poco a poco hasta convertirse otra vez en luna nueva. El ciclo completo dura alrededor de un mes. Dicho ciclo es regular, lo mismo que lo es el recorrido de la luna a través de los signos del zodíaco, pero existe un neto desfase entre uno y otro. La luna nueva reaparece, por término medio, cada 29 días y medio (la duración de un ciclo puede apartarse hasta medio día del valor promedio reseñado); es decir, con un período superior en dos días al tiempo medio que tarda en su revolución alrededor del zodíaco. En consecuencia, las sucesivas posiciones de la luna nueva entre las constelaciones se sitúan cada

vez más hacia el este. Si, por ejemplo, la nueva luna se halla un determinado mes sobre el punto equinoccial de primavera o punto vernal, cuando 27 días y un tercio más tarde vuelva a pasar por dicho punto aún estará en su fase decreciente. La luna nueva no aparecerá hasta pasados dos días y, en dicho momento, habrá progresado unos 30° hacia el este del punto vernal.

Las fases de la luna, dada la facilidad con que pueden ser observadas y la comodidad intrínseca de los intervalos en que se reproducen, han constituido la más antigua de todas las unidades de calendario. Se han encontrado formas primitivas de la semana y del mes en un calendario babilónico del tercer milenio antes de nuestra era. En dicho calendario cada mes daba comienzo el primer día de la fase de luna creciente; el mes estaba subdividido en cuatro períodos, que comenzaban respectivamente los días séptimo, catorceavo y vigésimoprimero, correspondientes al inicio de los “cuartos” del ciclo lunar. En los albores de la civilización, los hombres han debido contar las nuevas lunas y sus cuartos para medir los intervalos de tiempo; A medida que fue progresando el proceso civilizador, se intentó repetidas veces organizar dichas unidades fundamentales en un calendario que fuera coherente a largo término, es decir, que permitiera establecer una cronología histórica a la vez que facilitara la preparación de los documentos más corrientes, tales como contratos a los que debía hacerse honor en una fecha predeterminada.

Éste fue el momento en que el calendario lunar, simple y evidente, se mostró insuficiente. Las lunas nuevas consecutivas pueden estar separadas por 29 o 30 días, y sólo una compleja teoría matemática, que exige un estudio y una observación sistemáticos a lo largo de varias generaciones, permite determinar la duración de un futuro mes lunar en concreto. Otro tipo de dificultades proviene de la inconmensurabilidad de las duraciones medias de los respectivos ciclos del sol y de la luna. La mayor parte de las sociedades (aunque no todas, pues en algunas regiones del Oriente Medio aún se emplean auténticos calendarios lunares) deben ajustar sus calendarios a las variaciones climáticas anuales que dependen del sol, con lo que se hace necesario disponer de un método sistemático que permita

insertar un eventual treceavo mes en el año básico ordinario compuesto por 12 meses lunares (354 días). Éstos parecen haber sido los primeros problemas técnicos difíciles con los que se enfrentó la astronomía antigua. A ellos, más que a ningún otro, cabe hacer responsables del nacimiento de la observación y teoría cuantitativas de los planetas. Los astrónomos babilónicos, que acabaron por resolver estos problemas del calendario entre los siglos VIII y III antes de nuestra era, período durante el cual la ciencia griega se hallaba, en gran medida, dando sus primeros balbuceos, acumularon un gran número de datos fundamentales, incorporados ulteriormente a la estructura ya desarrollada del universo de las dos esferas.

Contrariamente a cuanto sucede con la luna y el sol, los cinco planetas restantes se nos muestran en el cielo como simples puntos luminosos. El observador poco experimentado, en una observación a simple vista, no los distingue de las estrellas a no ser por su movimiento gradual alrededor de la eclíptica, comportamiento sólo deducible después de agrupar una larga serie de observaciones continuadas. En general, los planetas se desplazan hacia el este a través de las constelaciones mediante lo que se denomina su “movimiento normal”. Mercurio y Venus emplean por término medio un año para recorrer completamente el zodíaco; también por término medio, Marte emplea 687 días, Júpiter 12 años y Saturno 29 años. El tiempo exacto que dura el recorrido puede diferir notablemente en todos los casos indicados. Además, cuando un planeta se dirige hacia el este a través de las estrellas, su progresión no se lleva a cabo con una velocidad uniforme.

Los planetas no siempre se mueven en dirección este. El movimiento normal de todos los planetas, si exceptuamos el sol y la luna, se ve en algunos casos reemplazado durante breves intervalos por un movimiento de “retroceso” hacia el oeste o movimiento retrógrado. Comparemos, por ejemplo, la retrogradación de Marte dentro de la constelación de Tauro, representada en la figura 15, con el movimiento normal del sol dentro de dicha constelación, esquematizado en la figura 9 (p. 36). Cuando entra en la región del cielo representada en la figura, Marte sigue un movimiento normal (hacia el este), pero a medida que progresa en su movimiento va perdiendo velocidad de forma gradual hasta que llega un momento en que

la dirección de su movimiento se invierte, retrogradando a partir de aquí en dirección oeste. Los restantes planetas tienen un comportamiento análogo, es decir, todos y cada uno de ellos toman momentáneamente un movimiento retrógrado tras un determinado tiempo de recorrer su órbita normal. Mercurio invierte la dirección de su movimiento a través de las estrellas cada 116 días, Venus cada 584 días, Marte, Júpiter y Saturno cada 780, 399 y 378 días respectivamente.

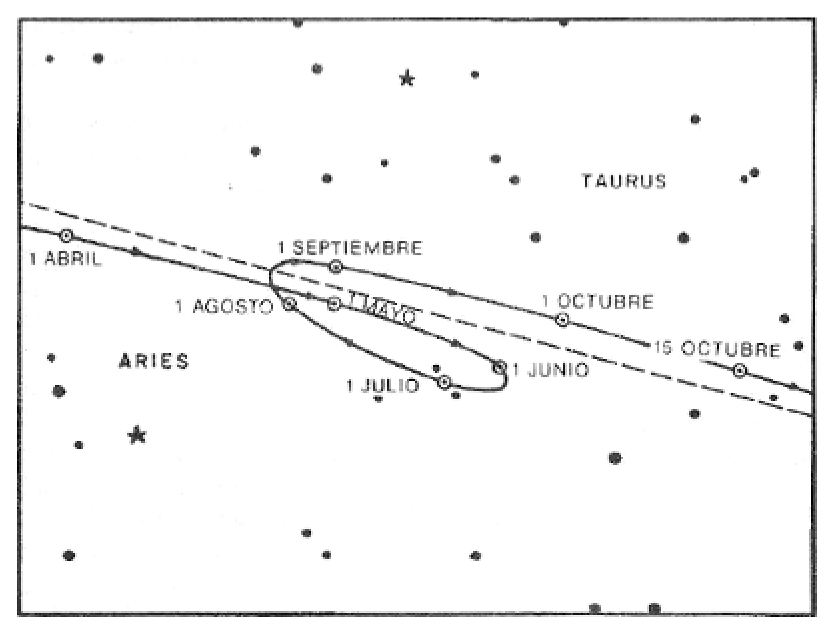


FIGURA 15. — Retrogradación de Marte a través de las constelaciones de Aries y Taurus. El sector de cielo que aparece en el presente diagrama es el mismo que el de la figura 9 y el encerrado en el recuadro del mapa estelar de la figura 8. La linea de trazo discontinuo es la eclíptica y la de trazo continuo representa la trayectoria del planeta. Obsérvese que Marte no permanece sobre la eclíptica y que, a pesar de que su movimiento general a través de las estrellas se efectúe en dirección este, hay un período, de mediados de junio a comienzos de agosto, en el que se mueve hacia el oeste. Las retrogradaciones de Marte siempre tienen una forma y duración muy similares, pero no siempre se producen en las mismas fechas ni dentro del mismo sector de cielo.

Los cinco planetas tienen un comportamiento muy similar por lo que respecta a su movimiento hacia el este, periódicamente interrumpido por sus retrogradaciones hacia el oeste. Pero existe una característica adicional en el movimiento de los planetas; a saber, su posición con respecto a la del sol, que los divide en dos grupos: Mercurio y Venus, los denominados planetas inferiores, nunca se alejan demasiado del sol. Mercurio siempre está situado a menos de 28° del disco solar, mientras que la “elongación”

máxima de Venus es de 45°. El movimiento de estos dos planetas es un lento vaivén permanente a uno y otro lado del sol; durante un cierto tiempo se mueven en dirección este acompañando al sol, más tarde retrogradan y se sitúan al otro lado del disco solar y, finalmente, invierten una vez más su movimiento hasta atraparlo de nuevo. Cuando están situados al este del sol, ambos planetas inferiores se nos muestran como "estrellas vespertinas", haciéndose visibles poco después de ponerse el sol y acompañándole casi de inmediato en su desaparición por debajo del horizonte. Cuando después de retrogradar se sitúan al oeste del sol, ambos planetas se convierten en "estrellas matutinas", apareciendo poco antes del alba y desvaneciéndose en cuanto el sol apunta por el horizonte. En el intervalo que separa ambas localizaciones, es decir, cuando están situados en las proximidades del sol, Mercurio y Venus dejan de ser visibles por completo. Como consecuencia de cuanto acabamos de exponer, antes de que su movimiento fuera analizado con respecto a la esfera de las estrellas, ambos planetas inferiores eran considerados cuerpos celestes distintos según aparecieran como estrellas matutinas o como estrellas vespertinas. Durante milenios, Venus fue designado bajo un nombre cuando aparecía por el este poco antes del alba y bajo otro distinto cuando, varias semanas más tarde, se hacía de nuevo visible por encima del horizonte oeste poco después de ponerse el sol.

Contrariamente a cuanto sucede con Mercurio y Venus, los llamados planetas superiores, Marte, Júpiter y Saturno, no restringen su movimiento a los alrededores de la zona del cielo ocupada por el sol. Algunas veces están muy cerca o "en conjunción" con él, mientras que otras están a 180° de distancia del sol o "en oposición" a éste; entre ambos extremos, ocupan todas las posiciones intermedias. Contra lo que parece lógico presuponer de esta aparente libertad, lo cierto es que el comportamiento de los planetas depende de su posición con respecto al sol. Los planetas superiores sólo retrogradan cuando se hallan en oposición al sol. Además, es precisamente cuando retrogradan hacia el este que los planetas superiores brillan de forma más intensa en los cielos. Este incremento en el brillo, que ha sido normalmente interpretado (como mínimo, a partir del siglo IV antes de

nuestra era) como indicativo de que la distancia entre el planeta y la tierra ha disminuido, es particularmente sorprendente en el caso de Marte. Habitualmente bastante apagado, cuando se halla en oposición con respecto al sol, Marte eclipsa con su resplandor a todos los cuerpos celestes visibles durante la noche, excepción hecha de la luna y de Venus.

El interés por las cinco estrellas errantes no se remonta en el tiempo hasta épocas tan pretéritas como el desencadenado por el sol y la luna, probablemente porque dichas estrellas errantes no tenían una utilidad práctica inmediata en la vida de los pueblos de la antigüedad. Sin embargo, ya diecinueve siglos antes de nuestra era se consignaron en Mesopotamia una serie de observaciones sobre la aparición y la desaparición de Venus. Con toda probabilidad dichas apariciones debieron ser interpretadas como augurios, de forma similar a los signos leídos en las entrañas de los animales sacrificados. Esta serie de observaciones dispersas presagian el posterior desarrollo de una astrología sistemática empleada como medio predictivo, aspecto que examinaremos dentro del próximo capítulo vinculándolo al desarrollo de la astronomía planetaria. Sin lugar a dudas es la misma preocupación por los augurios la que motivó entre los babilonios, desde mediados del siglo VIII antes de nuestra era, la observación y registro más sistemáticos y completos de eclipses, movimientos de retrogradación y otros asombrosos fenómenos planetarios. Ptolomeo, el decano de los astrónomos de la antigüedad, deploraría más tarde que incluso tales registros fueran demasiado fragmentarios. Sin embargo, fragmentarios o no, proporcionaron los primeros datos capaces de precisar en toda su extensión el problema de los planetas tal como debía ser desarrollado en Grecia a partir del siglo IV antes de nuestra era.

El problema de los planetas queda parcialmente especificado con la descripción que acabamos de dar en las páginas precedentes de los movimientos de los mismos. ¿Cómo ordenar de forma simple y operativa los complejos y variados movimientos planetarios? ¿Por qué retrogradan los planetas en determinados puntos de su trayectoria? ¿Cómo explicar su movimiento normal que, por otra parte, no deja de verse sometido a una serie de irregularidades? Las preguntas precedentes nos indican en qué

dirección iban a efectuarse la mayor parte de las investigaciones astronómicas a lo largo de los dos milenios que separan a Platón de Copérnico. Pero, dado que se trata de una descripción casi estrictamente cualitativa, cuanto acabamos de exponer sobre los planetas no precisa en modo alguno la totalidad de los aspectos del problema. Se limita a exponer un problema en versión simplificada y, en cierto sentido, un problema falso. No tardaremos en ver que es relativamente fácil inventar una serie de teorías planetarias satisfactorias desde el punto de vista cualitativo, pues los movimientos descritos líneas más arriba pueden ser ordenados de muy diversas formas. Por otro lado, el problema que se le plantea al astrónomo no tiene nada de sencillo. Debe explicar no sólo la existencia de un movimiento intermitente hacia el oeste imbricado con el movimiento general de los planetas hacia el este a través de las estrellas, sino también la posición exacta de cada uno de aquéllos con respecto a éstas en los diferentes días, meses y años de un largo período de tiempo. El verdadero problema de los planetas, el que conduce a la revolución copernicana, es el problema cuantitativo descrito en las largas tablas que precisan, en grados y minutos de arco, la errática posición de cada planeta.

LA LOCALIZACIÓN DE LOS PLANETAS

El universo de las dos esferas presentado en el capítulo precedente no da ninguna indicación explícita acerca de las posiciones o movimientos de los siete planetas. Incluso no contempla para nada la localización del sol. Para mostrársenos “sobre” el punto vernal (o sobre cualquier otro punto de la esfera estelar), el sol debe simplemente encontrarse en alguna parte de la línea que va desde el ojo del observador al punto en cuestión o a su prolongación en la bóveda espacial. El sol, lo mismo que los demás planetas, puede hallarse en la esfera de las estrellas, dentro de ella o en su exterior. Pero si bien el universo de las dos esferas no especifica con precisión la forma o localización de las órbitas planetarias, da ciertas órbitas y posiciones como más plausibles que otras, guiando y restringiendo con

ello el camino que debe seguir el astrónomo para abordar el problema de los planetas. Dicho problema fue planteado a partir de resultados de observación, pero a partir del siglo IV antes de nuestra era se atacó su resolución dentro del marco conceptual proporcionado por la cosmología de las dos esferas. Así pues, tanto observación como teoría contribuyeron de forma esencial al desarrollo del problema de los planetas.

En el ámbito de una cosmología como la de las dos esferas, las órbitas planetarias deberían, hasta donde fuera posible, mantener y extender la simetría fundamental encarnada en las dos esferas. Así pues, desde una perspectiva ideal, las órbitas planetarias deberían ser círculos concéntricos alrededor de la tierra, y los planetas vendrían obligados a moverse sobre dichos círculos con la misma regularidad con que lo hace la esfera de las estrellas. Esta situación ideal no concuerda con los hechos observados. Una órbita circular centrada en la tierra y situada en el plano de la eclíptica puede proporcionar una buena explicación al movimiento anual del sol, mientras que un círculo análogo da cuenta con bastante aproximación del algo más irregular movimiento lunar. Sin embargo, las órbitas circulares no dan la más mínima explicación a las grandes irregularidades, como los movimientos de retrogradación que se observan en los movimientos de las otras cinco “estrellas” vagabundas. Con todo, los astrónomos que se adherían a la cosmología de las dos esferas podían pensar, como de hecho hicieron a lo largo de varios siglos, que los círculos alrededor de la tierra eran las órbitas naturales de los planetas. Dichas órbitas explicaban como mínimo el movimiento general planetario hacia el este, mientras que los cambios de velocidad o dirección en su movimiento eran claros indicadores de que el propio planeta se había desviado de su órbita circular natural a la que retornaría una vez pasado determinado lapso de tiempo. En el marco del precedente análisis, el problema de los planetas quedaba reducido a proporcionar una explicación más o menos plausible de las desviaciones observadas con respecto al movimiento usual en términos de una desviación correspondiente de cada uno de los planetas respecto a su órbita circular particular.

En las tres secciones que siguen examinaremos algunas de las explicaciones que dieron los astrónomos de la antigüedad a las desviaciones reseñadas. Sin embargo, antes de abordar tal aspecto, haremos hincapié, tal como, por otra parte, hacían los antiguos, sobre cuán lejos podía llegarse despreciando las irregularidades mencionadas y admitiendo simplemente que todas las órbitas planetarias son, al menos en una primera aproximación, circulares. Dentro del marco proporcionado por el universo de las dos esferas, puede afirmarse casi sin temor a caer en el error que todos los planetas se mueven en la región situada entre la tierra y las estrellas. A menudo se presentó a la propia esfera estelar como el límite externo del universo, con lo que se concluía que los planetas no podían estar situados más allá de dicha esfera. La diferencia observada entre los movimientos planetarios y los movimientos estelares convertía en escasamente probable la presunción de que los planetas estuvieran situados sobre la esfera exterior; antes bien, ayudaba a pensar que se hallaban situados en una región intermedia donde se hallaban sometidos a determinadas influencias inoperantes sobre la esfera estelar. La argumentación que acabamos de exponer se veía reforzada por el hecho de que desde la tierra eran perfectamente visibles algunos detalles topográficos de la luna, dato que permite suponer que al menos uno de los planetas se halla más cerca de la tierra que las estrellas. Los astrónomos de la antigüedad situaron las órbitas planetarias en el vasto espacio, hasta entonces vacío, que se extiende entre la tierra y la esfera de las estrellas. Hacia finales del siglo IV antes de nuestra era, el universo de las dos esferas comenzaba a poblarse. Más tarde, acabaría atestado de cuerpos celestes.

Una vez conocida la localización general y la forma de sus órbitas, resultó posible hacer conjeturas plausibles y satisfactorias sobre el orden en que estaban colocados los distintos planetas. Se supuso que planetas como Saturno y Júpiter, cuyo movimiento hacia el este es especialmente lento y cuyo movimiento total muestra, como consecuencia de lo anterior, un cariz muy similar al de las estrellas, estaban muy cerca de la esfera exterior y alejados de la tierra. Por otro lado, la luna, que cada día pierde alrededor de 12° en su carrera con las estrellas, debía estar muy cerca de la superficie

inmóvil de la tierra. Parece ser que algunos filósofos de la antigüedad justificaron esta disposición hipotética imaginando que los planetas flotaban en el seno de un gigantesco remolino de éter cuya superficie exterior se movía rápidamente al unísono con la esfera de las estrellas, mientras que la exterior estaba en reposo en los alrededores de la superficie terrestre. Todo planeta sumergido en el seno de tal remolino, se retrasaba tanto más respecto a la esfera de las estrellas cuanto más cerca estaba de la tierra. Otros filósofos llegaron a idénticas conclusiones a través de otro tipo de razonamientos que, en lo que respecta a sus partes esenciales, fueron adoptados por el arquitecto romano Vitrubio (siglo I antes de nuestra era). Cuando analiza las diferencias entre los lapsos de tiempo que necesitan los diversos planetas para recorrer la eclíptica, Vitrubio sugiere una esclarecedora analogía:

Es como si se hubieran colocado siete hormigas sobre una rueda de alfarero en la que existieran otras tantas ranuras concéntricas de dimensiones crecientes, desde la más interna hasta la periférica, y se las obligara a circular a lo largo de éstas mientras la rueda gira en sentido inverso al de su movimiento. Puede constatarse que la rotación de la rueda en sentido contrario al del movimiento de avance de las hormigas no les impide completar sus propios circuitos, y que la que se halla más cerca del centro es la que emplea menos tiempo en recorrer su circunvolución, mientras que la que avanza por la ranura periférica, aunque marche a la misma velocidad que aquélla, tarda mucho más en completarla a causa de la mayor longitud de su circunferencia. Del mismo modo, los astros, que luchan contra la marcha general del universo, se desplazan completando una órbita perfectamente determinada, pero la rotación de los cielos les somete a movimientos de retrogradación durante su revolución cotidiana. [2.1]

Antes de finales del siglo IV antes de nuestra era, argumentos como el que acabamos de exponer habían conducido a una representación del

universo similar a la que se esboza en la figura 16. Tales esquemas, o sus correspondientes explicaciones, pasaron a formar parte de las obras elementales sobre astronomía o cosmología publicadas hasta principios del siglo XVII, es decir, hasta bastante después de la muerte de Copérnico. La tierra se halla situada en el centro de la esfera estelar que limita el universo. Inmediatamente después de la esfera exterior aparece la órbita de Saturno, el planeta que tarda más en describir su trayectoria a través del zodíaco; a continuación se hallan Júpiter y Marte.

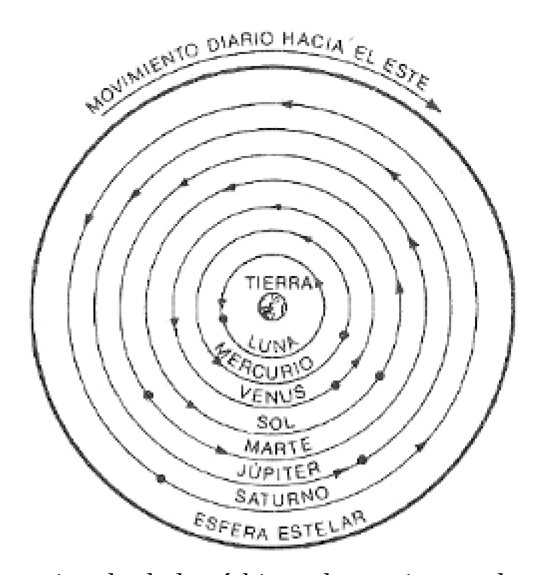


FIGURA 16. — Esquema aproximado de las órbitas planetarias en el universo de las dos esferas. El círculo exterior es una sección recta de la esfera de las estrellas en el plano de la eclíptica.

Hasta aquí, el orden escogido se ve libre de todo equívoco; los planetas están dispuestos, partiendo de la esfera exterior, según un orden decreciente de sus períodos orbitales. La misma técnica convierte a la órbita lunar en la más próxima a la tierra. Pero los tres planetas restantes plantean un problema, a saber, tanto el sol, como Venus y Mercurio tardan un mismo tiempo medio en completar su revolución alrededor de la tierra, un año, y, por consiguiente, no podían ser ordenados atendiendo a idéntico criterio que el empleado para localizar a los planetas restantes. De hecho, durante la antigüedad se plantearon numerosas controversias acerca del orden en que debían situarse las órbitas de los tres últimos planetas mencionados. Hasta el siglo II antes de nuestra era, la mayor parte de los astrónomos situaban la

órbita del sol inmediatamente después de la de la luna, a la que seguían, y en este orden, las de Venus, Mercurio y Marte. Sin embargo, a partir del siglo II, el orden representado en la figura 16 —la luna, Mercurio, Venus, el sol, Marte, etc.— fue casi unánimemente aceptado. En particular, fue el adoptado por Ptolomeo, y su gran autoridad en la materia lo impuso a la mayor parte de sus sucesores. Lo tomaremos, pues, como marco de referencia en las discusiones sostenidas dentro de los primeros capítulos del presente texto.

Considerada como diagrama estructural, la figura 16 es aún muy grosera, pues no da ninguna indicación significativa sobre las dimensiones relativas de las diversas órbitas ni intenta dar cuenta de las irregularidades observadas en los movimientos planetarios. No obstante, la concepción del universo representada en el diagrama cumple dos funciones importantes en el ulterior desarrollo de la astronomía y la cosmología. En primer lugar, el diagrama en cuestión contiene la mayor parte de la información sobre la estructura del universo geocéntrico que llegó a ser patrimonio común de los no especialistas. Los ulteriores perfeccionamientos de la antigua astronomía, por los que pronto nos interesaremos, eran demasiado matematizados para que pudieran ser comprendidos por una amplia capa de profanos. Como muestran con mayor claridad los dos capítulos próximos, las más influyentes entre las cosmologías desarrolladas a lo largo de la antigüedad y de la Edad Media no llegaron mucho más lejos de la presente imagen. La astronomía se hace esotérica y su desarrollo posterior privará al hombre del antiguo refugio cósmico.

Por otro lado, a pesar de su imperfección, el diagrama estructural representado en la figura 16 constituye un instrumento en extremo potente para enmarcar la investigación astronómica. Se muestra económico y fecundo desde muchos puntos de vista. Por ejemplo, durante el siglo IV antes de nuestra era, los conceptos sintetizados en este diagrama proporcionaron una explicación cualitativa completa de las fases de la luna y de sus eclipses; durante los siglos IV y III antes de nuestra era, los mismos conceptos condujeron a una serie de determinaciones relativamente precisas

sobre la circunferencia de la tierra; durante el siglo II antes de nuestra era, jugaron un papel básico en la estimación, brillantemente concebida, de las dimensiones del sol y la luna y sus respectivas distancias a nuestro planeta. Tales explicaciones y mediciones, particularmente las citadas en último lugar, atestiguan la notable ingeniosidad y fuerza de la tradición astronómica de la antigüedad. No obstante, dado que ninguna de las expuestas, a pesar de su relevancia dentro del proceso revolucionario, se vio afectada por los cambios radicales que sufrió la astronomía durante la revolución copernicana, hemos decidido relegar la exposición de las mismas al Apéndice técnico (secciones 3 y 4). La aptitud de la versión desarrollada y perfeccionada del universo de las dos esferas para explicar y prever los principales fenómenos celestes, tales como los eclipses, así como su eficacia para precisar ciertas dimensiones lineales de las regiones extraterrestres, acrecentaron de forma considerable la influencia de dicho esquema conceptual sobre el espíritu, tanto de astrónomos como de profanos.

Sin embargo, el problema fundamental, planteado por la constante irregularidad de los movimientos planetarios, siguió sin resolverse y, en último análisis, ésta es la piedra angular sobre la que se apoya todo el complejo edificio de la revolución copernicana. Como otros muchos problemas de la astronomía antigua, parece ser que se tuvo pleno conocimiento de su existencia por primera vez dentro del siglo IV antes de nuestra era, cuando al intentar dar con una explicación a su movimiento diurno en el marco del universo de las dos esferas, los astrónomos griegos detectaron y aislaron las irregularidades planetarias residuales. Durante los cinco siglos siguientes, las diversas tentativas para explicar dichas irregularidades dieron nacimiento a varias teorías planetarias de una precisión y potencia sin precedentes. Estas tentativas constituyen la parte más abstrusa y matematizada de la astronomía antigua, razón por la que con frecuencia se ven excluidas de obras como la presente. Si bien parece indispensable conocer aunque sólo sea un resumen simplificado de la teoría planetaria de la antigüedad para comprender la revolución copernicana con cierta solidez, quizás algunos lectores prefieran dar una rápida ojeada a las

tres secciones que vienen a continuación (en particular a la primera de ellas, en la que la parte técnica de la exposición es particularmente densa) y retornar al texto con la discusión sobre las creencias científicas que concluye este segundo capítulo.

La teoría de las esferas homocéntricas

Platón, cuyas penetrantes preguntas tan gran influencia ejercieron sobre el pensamiento griego subsiguiente, parece haber sido el primero, como no, en enunciar el problema de los planetas. Se atribuye a Platón la siguiente pregunta, que habría sido planteada en las primeras décadas del siglo IV antes de nuestra era: “¿Cuáles son los movimientos uniformes y ordenados que pueden ser tomados como hipótesis para explicar los movimientos aparentes de los planetas?”.[2.2] La primera respuesta a la pregunta fue dada por Eudoxo (c. 408-c. 355 antes de nuestra era), su discípulo en un tiempo. En el sistema de Eudoxo cada planeta se halla situado en la esfera interior de un grupo de dos o más de ellas, interconectadas y concéntricas, cuya rotación simultánea en torno a diferentes ejes reproduce el movimiento observado del planeta. La figura 17*a* muestra un corte transversal de dos de estas esferas engranadas, cuyo centro común es la tierra y cuyos puntos de contacto son los extremos del eje inclinado de la esfera interior que le sirven de pivotes. La esfera exterior es la esfera de las estrellas, o al menos tiene su mismo movimiento; su eje pasa por los polos norte y sur celestes y da una revolución completa alrededor del mismo, en dirección oeste, cada 23 horas 56 minutos. El eje de la esfera interior está en contacto con la esfera exterior en dos puntos diametralmente opuestos y situados a una distancia angular de 23° y medio de cada uno de los polos celestes; el ecuador de la esfera interior, cuando se lo observa desde la tierra, siempre coincide con la eclíptica de la esfera de las estrellas, sea cual sea la rotación de ambas esferas.

Si consideramos que el sol está situado en un punto cualquiera del ecuador de la esfera interior, y si hacemos que ésta gire lentamente en

dirección este alrededor de su eje de tal forma que dé una revolución completa al cabo de un año mientras la esfera exterior gira alrededor del suyo al ritmo de una vuelta al día, la suma de ambos movimientos reproducirá el movimiento observado del sol. La esfera exterior simula el movimiento diurno en dirección oeste, movimiento según el cual vemos levantarse y ponerse al sol; la esfera interior reproduce el movimiento anual, más lento que el anterior y en dirección este, que sigue el sol a lo largo de la eclíptica. Del mismo modo, si cada 27 días y un tercio ocurre una rotación completa de la esfera interior y si la luna se encuentra en el ecuador de dicha esfera, el movimiento de ésta deberá constituir el movimiento medio de la luna en torno a la eclíptica. Si añadimos al sistema que acabamos de exponer una nueva esfera animada de un movimiento de rotación muy lento, es posible describir con bastante aproximación las desviaciones de la luna hacia el norte y hacia el sur de la eclíptica y algunas de las irregularidades que aparecen en los períodos requeridos por la luna para llevar a cabo sus sucesivas revoluciones. Eudoxo también empleaba (aunque no fuera necesario) una tercera esfera para describir el movimiento del sol; es decir, para tratar conjuntamente al sol y la luna eran necesarias seis esferas.

Las esferas de la figura 17 se denominan homocéntricas porque tienen un centro común, la tierra. Con dos o tres de tales esferas se puede representar con buena aproximación el movimiento total del sol y de la luna, pero no quedan explicados en modo alguno los movimientos de retrogradación de los planetas. Eudoxo demostró su gran genio como geómetra en la modificación del sistema que introdujo para tratar el comportamiento aparente de los otros cinco planetas, empleando para explicar el movimiento de cada uno de ellos un total de cuatro esferas, según el esquema que se muestra en sección transversal en la figura 17*b*. Las dos esferas exteriores se mueven de forma idéntica a las de la figura 17*a*: la más exterior de ambas sigue el movimiento diurno de la esfera de las estrellas, mientras que la otra gira en dirección este, de tal forma que el tiempo que emplea para dar una revolución equivale al tiempo *medio* que necesita el planeta correspondiente para recorrer la eclíptica (por ejemplo,

la segunda esfera de Júpiter tarda 12 años en dar una vuelta completa). La tercera esfera está en contacto con la segunda en dos puntos diametralmente opuestos de la eclíptica (el ecuador de la segunda esfera), y el eje de la cuarta esfera, la interior, está unida a la tercera según un ángulo que depende de las características del movimiento a describir. El planeta (Júpiter en el ejemplo que muestra la figura adjunta) se halla sobre el ecuador de la cuarta esfera.

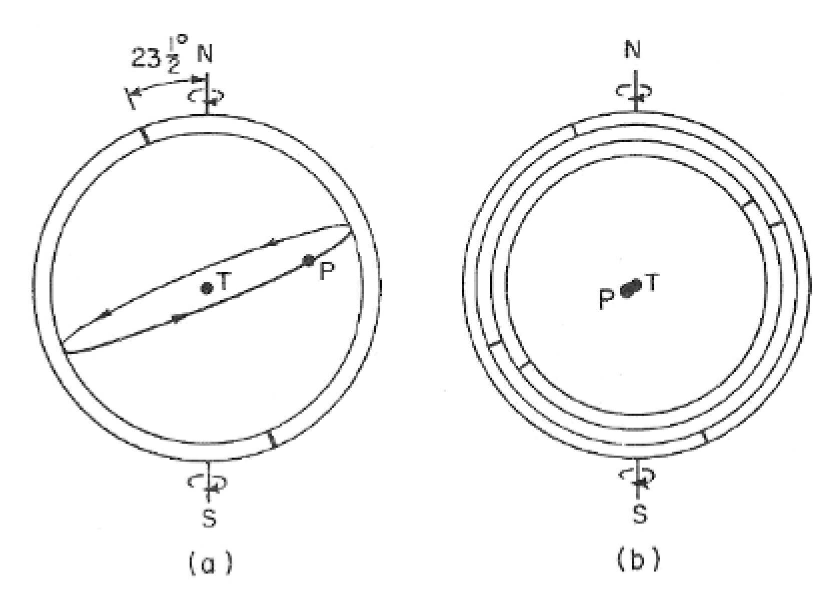


FIGURA 17. — Esferas homocéntricas. En el sistema de las dos esferas (*a*), la exterior produce la rotación diaria y la interior arrastra el planeta (el sol o la luna) en un movimiento regular hacia el este a lo largo de la eclíptica. En el sistema de las cuatro esferas (*b*), el planeta *P* está situado fuera del plano de la figura, ubicándose casi exactamente sobre una línea que una la tierra *T* con el ojo del lector. Las dos esferas más interiores producen entonces el movimiento en bucle representado en la figura 18, mientras que las dos esferas exteriores son las responsables del movimiento diario y de la deriva planetaria media hacia el este.

Supongamos ahora que las dos esferas interiores giran en sentidos opuestos, cada una de ellas completando una revolución axial en el intervalo de tiempo que separa dos retrogradaciones sucesivas del planeta (399 días para el caso de Júpiter), mientras que las dos esferas exteriores se mantienen en estado estacionario. Un observador que estuviera situado sobre la segunda esfera, a la que se supone temporalmente estacionaria, vería como el planeta describe con lentitud una órbita en forma de ocho cuyos bucles son bisecados por la eclíptica. Este movimiento se halla

representado en la figura 18; el planeta recorre lentamente los bucles, pasando de la posición 1 a la 2, de la 2 a la 3, de la 3 a la 4,…, emplea idéntico tiempo para cada uno de estos intervalos y regresa a su punto de partida una vez transcurrido el período que separa dos retrogradaciones sucesivas. Durante su movimiento desde el punto 1 al 5, pasando por el 3, el planeta se desplaza hacia el este a lo largo de la eclíptica; durante la otra mitad del recorrido, cuando el planeta regresa desde el punto 5 al 1, pasando por el 7, el movimiento tiene lugar en dirección oeste.

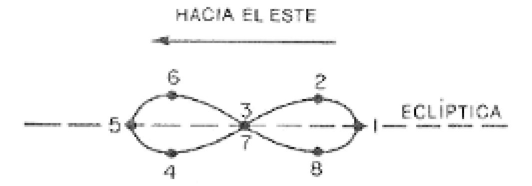


FIGURA 18. — El movimiento en bucle producido por las dos esferas homocéntricas internas. En el sistema completo de cuatro esferas, este movimiento en bucle se combina con el movimiento regular hacia el este de la segunda esfera, movimiento que por sí mismo arrastraría el planeta a lo largo de la eclíptica con velocidad constante. Cuando le añadimos el movimiento en bucle, el movimiento total del planeta adquiere una velocidad variable y abandona periódicamente la eclíptica. Cuando el planeta se traslada sobre el bucle desde 1 a 5, su movimiento total es más rápido que el movimiento medio hacia el este generado por la segunda esfera; cuando retorna desde 5 a 1, su movimiento hacia el este es más lento que el que produce la segunda esfera; cuando está en las proximidades del punto 3, el planeta puede retrogradar hacia el oeste.

Dejemos ahora que la segunda esfera se mueva en dirección este arrastrando consigo las dos esferas interiores, y supongamos que el movimiento total del planeta respecto a las estrellas es observado desde la primera esfera, a la que haremos permanecer inmóvil de forma provisional. El planeta se desplaza constantemente hacia el este arrastrado por el movimiento de la segunda esfera, y durante la mitad del tiempo que invierte en recorrer una trayectoria completa (cuando se desplaza desde la posición 5 a la 1 según el esquema representado en la figura 18) se ve sometido a un movimiento adicional hacia el este impuesto por las dos esferas interiores, con lo que resulta que el movimiento resultante tiene la dirección este y la órbita se recorre a mayor velocidad que en el caso de tomar como única referencia el movimiento de la segunda esfera. Sin embargo, durante la mitad del tiempo restante (cuando el planeta pasa de la posición 5 a la 1), al

movimiento hacia el este de la segunda esfera se opone un movimiento hacia el oeste debido a las dos esferas interiores. Cuando este movimiento hacia el oeste alcanza su mayor velocidad (muy cerca del punto 7, en la figura 18), la proyección del movimiento resultante del planeta sobre la esfera de las estrellas puede ser en realidad un movimiento hacia el oeste, es decir, en sentido retrógrado. Precisamente ésta es la característica de los movimientos planetarios que Eudoxo se esforzaba en reproducir en su modelo.

Un sistema de cuatro esferas homocéntricas engranadas reproduce con bastante aproximación el movimiento retrógrado de Júpiter, mientras que un segundo conjunto de cuatro esferas puede darnos cuenta del movimiento de Saturno. Para explicar el movimiento de cada uno de los tres planetas restantes se necesitan cinco esferas (ampliación del modelo efectuada por Calipo, discípulo de Eudoxo, hacia el 330 antes de nuestra era) y, por consiguiente, el análisis de los movimientos resultantes se hace más complejo. Por suerte no tenemos necesidad alguna de estudiar con mayor profundidad estas cada vez más complejas combinaciones de esferas en rotación, pues todos los sistemas homocéntricos presentaban un grave inconveniente que condujo, ya en la antigüedad, a un rápido abandono de los mismos. La teoría de Eudoxo coloca a cada planeta sobre una esfera que tiene a la tierra como centro; de ahí se sigue que las distancias entre los planetas y la tierra son invariantes, pero, de hecho, se observa que cuando aquellos retrogradan se muestran mucho más brillantes, es decir, parecen haberse aproximado a la tierra. El sistema de las esferas homocéntricas suscitó numerosas críticas en la antigüedad dada su incapacidad para explicar dicha variación en el brillo planetario, con lo que la mayor parte de los astrónomos lo abandonaron tan pronto como fue propuesta una explicación más satisfactoria.

A pesar de todo, aunque su vida como sistemas astronómicos significativos haya sido efímera, los sistemas homocéntricos desempeñaron una función de primer orden en la evolución del pensamiento astronómico y cosmológico. Por un azar histórico, el siglo durante el cual parecieron aportar la explicación más prometedora de los movimientos planetarios

cubre la mayor parte de la vida de Aristóteles, quien los integró en la cosmología más completa, detallada e influyente desarrollada en el mundo antiguo. En el curso de los siglos que siguieron a la muerte de Aristóteles ninguna otra cosmología tan completa incorporó el sistema matemático de los epiciclos y los deferentes para explicar el movimiento de los planetas. La idea de que los planetas se hallan engarzados en conchas esféricas en rotación cuyo centro es la tierra formó parte del pensamiento cosmológico hasta las primeras décadas del siglo XVII. Incluso los escritos de Copérnico nos revelan importantes vestigios de dicho concepto. En el título de su obra inmortal, *De revolutionibus orbium coelestium*, las "órbitas" o esferas no son los planetas propiamente dichos, sino los caparazones esféricos concéntricos sobre los que se engarzan los planetas y las estrellas.

EPICICLOS Y DEFERENTES

El origen del dispositivo que reemplazó a las esferas homocéntricas como modelo explicativo de los detalles del movimiento planetario nos es desconocido. Sin embargo, sabemos perfectamente que sus características fueron estudiadas y expuestas en época bastante temprana por dos astrónomos y matemáticos griegos, Apolonio e Hiparco, cuyos trabajos cubren el período que va desde mitades del siglo III hasta fines del siglo II antes de nuestra era. En su forma más simplificada (figura 19*a*), el nuevo mecanismo matemático propuesto para dar explicación a los movimientos de los planetas se compone de un pequeño círculo, el epiciclo, que gira con movimiento uniforme alrededor de un punto situado sobre la circunferencia de un segundo círculo en rotación, el deferente. El planeta *P* está situado sobre el epiciclo y el centro del deferente coincide con el centro de la tierra.

El sistema epiciclo-deferente sólo pretende explicar el movimiento planetario con respecto a la esfera de las estrellas. El epiciclo y el deferente representados en la figura 19*a* se suponen situados sobre el plano de la eclíptica, de tal forma que la rotación de la esfera estelar alrededor de la tierra arrastra a todo el conjunto (a excepción hecha de nuestro planeta) en

su rotación diaria, produciéndose así el movimiento diurno del planeta. Si el epiciclo y el deferente del planeta se mantuvieran estacionarios y no tuvieran un movimiento adicional que les fuera propio, el planeta se mantendría en el plano de la eclíptica con idéntico movimiento al de una estrella zodiacal; es decir, describiría una revolución circular completa dirigiéndose hacia el oeste cada 23 horas 56 minutos. De aquí en adelante, cada vez que se haga alusión al movimiento del deferente o al del epiciclo nos referiremos al movimiento *adicional* sobre el plano de la eclíptica que poseen dichos círculos, dando por sobreentendido la rotación diurna de la esfera estelar y del plano de la eclíptica.

Supongamos, por ejemplo, que el deferente se mueve en dirección este completando su revolución al cabo de un año y que el sol está situado sobre él en la posición ocupada ahora por el centro del epiciclo, mientras que el epiciclo ha desaparecido de escena. En dicho caso, la rotación del deferente arrastra al sol en su recorrido a lo largo de la eclíptica; actuando de este modo se analiza el movimiento del sol, al menos de forma aproximada, en función del movimiento de un solo deferente situado en el plano de la eclíptica. Ésta es la técnica que se da por supuesta en la explicación de los movimientos planetarios representados en la figura 16.

Supongamos ahora que desaparece el sol del esquema global y que se restituye el epiciclo a su posición sobre el deferente. Si el epiciclo da exactamente tres vueltas alrededor de su centro móvil mientras el deferente efectúa una revolución completa, girando ambos círculos en un mismo sentido, el movimiento total del planeta sobre la esfera de las estrellas, resultante de la combinación de los movimientos del epiciclo y del deferente, tiene lugar exactamente según la curva representada en la figura 19*b*. Cuando la rotación del epiciclo arrastra al planeta fuera del deferente, los movimientos combinados de éste y del epiciclo obligan al planeta a dirigirse hacia el este, pero cuando el movimiento del epiciclo le coloca dentro del deferente, aquél arrastra al planeta hacia el oeste, es decir, en sentido opuesto al que sigue el deferente en su movimiento. Así pues, cuando el planeta está en su posición más próxima a la tierra, se pueden combinar los dos movimientos para producir un movimiento resultante

hacia el oeste o movimiento retrógrado. En la figura 19*b* el planeta retrograda cuando se encuentra en la parte interior de uno de los pequeños bucles, mientras que en el resto del recorrido sigue su movimiento normal, aunque variando su velocidad en diferentes tramos de la trayectoria.

La figura 19*c* nos muestra el movimiento del planeta cuando describe uno de los bucles tal como es visto en proyección sobre la esfera de las estrellas por un observador terrestre. El observador y el bucle están situados en un mismo plano, el de la eclíptica, por lo que, lógicamente, aquél no puede observar el bucle propiamente dicho. El observador ve tan sólo las sucesivas posiciones que ocupa el planeta sobre la línea de fondo que le proporciona la eclíptica. Así, cuando el planeta pasa de la posición 1 a la posición 2, en las figuras 19*b* y 19*c*, el observador le ve recorrer la eclíptica en dirección hacia el este. Cuando el planeta se aproxima a la posición 2 su movimiento parece disminuir en velocidad, se para momentáneamente al alcanzar el punto 2 y, acto seguido, reemprende su curso, ahora en dirección oeste, para ir desde la posición 2 hasta la posición 3. Finalmente, el recorrido del planeta en dirección oeste a lo largo de la eclíptica se detiene al alcanzar la posición 3, y el planeta reemprende su movimiento hacia el este hasta alcanzar la posición 4 sobre el bucle.

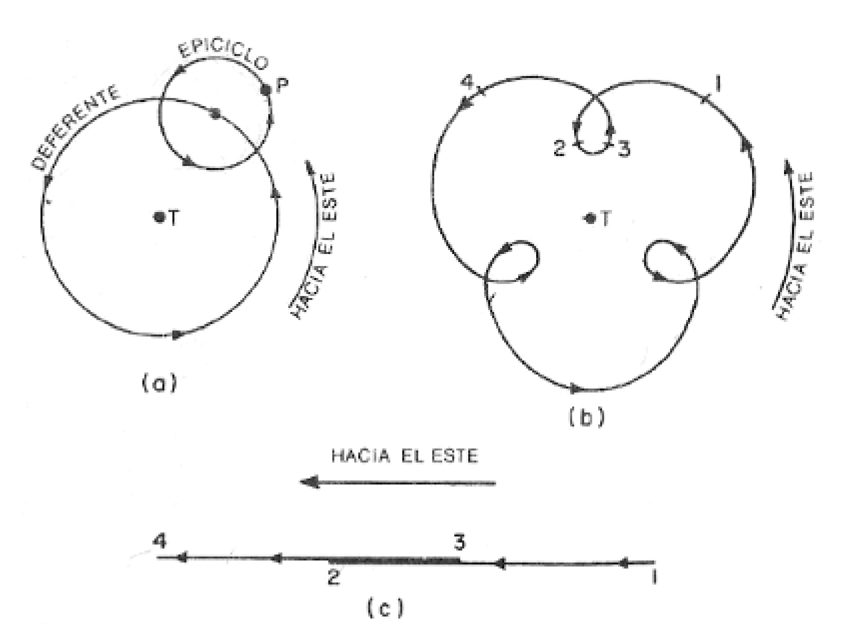


FIGURA 19. — El sistema básico epiciclo-deferente. En (*a*) se representa un caso típico de epiciclo y deferente; en (*b*) aparece el movimiento en bucle generado por tal sistema en el plano de la

eclíptica; en (*c*), se ofrece parte del movimiento representado en (*b*), el trayecto 1-2-3-4 tal como es visto por un observador situado sobre la tierra central *T*.

Un sistema constituido por un epiciclo y un deferente arrastra un planeta alrededor de la eclíptica en un tiempo medio exactamente igual al que necesita el deferente para completar una revolución. No obstante, el movimiento hacia el este se ve interrumpido a intervalos regulares, iguales al tiempo que emplea el epiciclo para dar una revolución completa, en los que el planeta retrograda hacia el oeste. Las duraciones respectivas de las revoluciones del epiciclo y del deferente pueden ser ajustadas de tal forma que den cuenta de los hechos observados para cualquiera de los planetas y reproduzcan sus intermitentes movimientos hacia el este a través de las estrellas. Por otro lado, el sistema epiciclo-deferente reproduce otro importante aspecto cualitativo de los hechos observados: un planeta sólo puede retrogradar cuando su movimiento lo lleva a ocupar el punto de su trayectoria más próximo a la tierra. Es precisamente al ocupar esta posición cuando el planeta debe presentar, y efectivamente presenta, una mayor intensidad de brillo. Su gran simplicidad y el haber dado por primera vez una explicación a la variación de la intensidad de brillo de los planetas son las principales razones que sustentan la victoria del nuevo sistema sobre el de las esferas homocéntricas.

El sistema epiciclo-deferente descrito en la figura 19 contiene una particular simplificación que no es característica del movimiento de ningún planeta. El epiciclo completa *exactamente* tres revoluciones por cada una de las que efectúa el deferente; cada vez que el deferente completa una revolución, el epiciclo reintegra el planeta a la misma posición que ocupaba en el instante preciso de iniciarse la revolución. Los bucles retrógrados siempre se producen en los mismos lugares y el planeta siempre necesita idéntico período de tiempo para llevar a cabo un recorrido completo a lo largo de la eclíptica. Sin embargo, cuando se construye para que se adapte a lo observado en el movimiento de tal o cual planeta, el sistema epiciclo-deferente jamás se comporta como acabamos de indicar. Por ejemplo, se observa que Mercurio necesita por término medio un año para recorrer la eclíptica y que retrograda una vez cada 116 días. Así pues, el epiciclo de

Mercurio debe completar algo más de tres vueltas mientras el deferente da un giro completo; el epiciclo completa tres revoluciones en 348 días, lapso de tiempo algo inferior al año que necesita el deferente para describir una revolución.

La figura 20*a* muestra la trayectoria de un planeta arrastrado a lo largo de una sola revolución alrededor de la eclíptica por un epiciclo que efectúa algo más de tres vueltas por cada una de las que completa su deferente. El planeta arranca del punto medio de un bucle retrógrado y completa su tercer bucle antes de que el deferente haya terminado su primera vuelta; así pues, el planeta describe por término medio algo más de tres bucles retrógrados en cada uno de sus recorridos a lo largo de la eclíptica. Si el movimiento de la figura 20*a* se continuara durante una segunda vuelta, los nuevos bucles retrógrados quedarían situados ligeramente al oeste de los descritos durante la primera vuelta. Los movimientos de retrogradación no se producirían en los mismos puntos durante las sucesivas revoluciones, siendo ésta una de las características observadas en el movimiento real de los planetas a lo largo de la eclíptica.

La figura 20*b* nos muestra una segunda característica del movimiento engendrado por un epiciclo que no completa un número entero de vueltas en cada una de las revoluciones del deferente. El planeta, situado en el punto *P*, se encuentra en su posición más próxima a la tierra, la que hemos tomado como punto de partida para su trayectoria en la figura 20*a*. Cuando el deferente haya completado una revolución, el epiciclo habrá dado algo más de tres vueltas, y el planeta se encontrará en el punto *P'*, es decir, al oeste del punto de partida. Así pues, el deferente debe girar en dirección este algo más de una revolución para hacer que el planeta dé una vuelta completa a lo largo de la eclíptica. En consecuencia, el correspondiente trayecto a través de las constelaciones requiere algo más de tiempo que el valor promedio; sin embargo, otros trayectos se completarán en un período inferior al medio. Después de varias revoluciones del deferente, el planeta —puesto que a medida que va completando giros a lo largo de la eclíptica ocupa al final de los mismos una posición cada vez más alejada de la tierra — podría empezar una nueva trayectoria partiendo de la nueva posición *P*

de la figura 20*c*. Una nueva revolución del deferente llevarla al planeta hasta *P'* punto situado al este de *P*. Puesto que esta revolución del deferente arrastra el planeta a lo largo de la eclíptica durante algo más de una vuelta completa, tal circunvolución es particularmente rápida. Las figuras 20*b* y 20*c* representan con notable aproximación los valores extremos del tiempo requerido para completar un giro a lo largo de la eclíptica; los recorridos intermedios se efectúan en períodos de tiempo de valores intermedios; por término medio, un giro a lo largo de la eclíptica requiere el mismo tiempo que una revolución del deferente. El sistema epiciclo-deferente da cuenta de las diferencias existentes entre un trayecto y el siguiente, proporcionando con ello una explicación bastante simple de una de las irregularidades observadas en los movimientos planetarios.

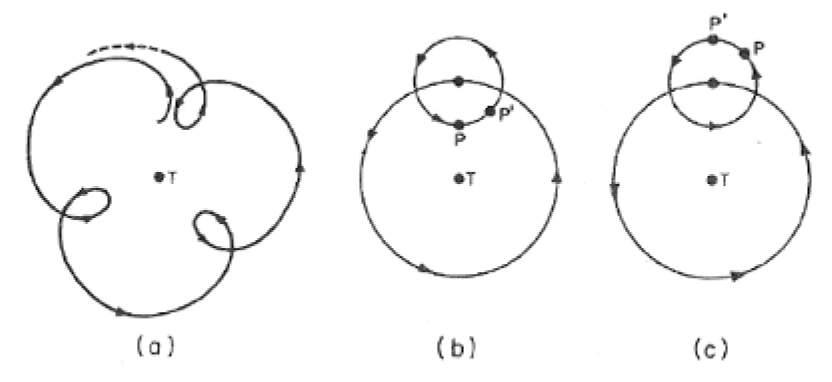


FIGURA 20. — Movimiento generado por un epiciclo y un deferente cuando aquél da algo más de tres vueltas por cada una de las del deferente. En (*a*) se muestra el trayecto del planeta a lo largo de una revolución completa a través de las estrellas. Dicho recorrido precisa más de una revolución del deferente, tal como se indica en (*b*), donde se muestran las posiciones inicial (*P*) y final (*P'*) del planeta durante la primera revolución completa del deferente. El diagrama (*c*) nos muestra las posiciones del planeta al principio y al final de una ulterior revolución del deferente, revolución que arrastra el planeta a lo largo de más de una vuelta en su recorrido sobre la eclíptica.

Para describir los movimientos de todos y cada uno de los planetas es necesario adaptar un sistema epiciclo-deferente particular a cada uno de ellos. El movimiento del sol y el de la luna pueden ser tratados con bastante aproximación con la ayuda de un solo deferente, pues dichos planetas no retrogradan. El deferente del sol tarda un año en completar su revolución, mientras que el de la luna emplea 27 días y un tercio. El sistema epiciclo-deferente de Mercurio es muy semejante al que acabamos de discutir; el

deferente completa su revolución en un año y el epiciclo emplea 116 días. Empleando las observaciones registradas en páginas precedentes del presente capítulo, podemos diseñar sistemas similares para los restantes planetas. La mayor parte de los mismos se someterían a trayectorias muy semejantes a la que se muestra en la figura 20*a*. Si la relación entre las dimensiones del epiciclo y del deferente aumenta, el tamaño de los bucles también lo hace. Si el epiciclo gira más rápido con respecto al deferente, el número de bucles que se forman a lo largo de la eclíptica crece. Hay aproximadamente once bucles en cada uno de los trayectos de Júpiter a lo largo de su eclíptica, y alrededor de veintiocho en los de Saturno. En resumen, puede afirmarse que es posible, por medio de variaciones adecuadas en las dimensiones y velocidades relativas de epiciclos y deferentes, ajustar este sistema de movimientos circulares compuestos de tal modo que nos describan de forma muy aproximada una gran variedad de movimientos planetarios. Una adecuada combinación de círculos podrá incluso proporcionarnos una buena explicación cualitativa de las múltiples e importantes irregularidades que se observa en el movimiento de un planeta tan atípico como Venus (figura 21).

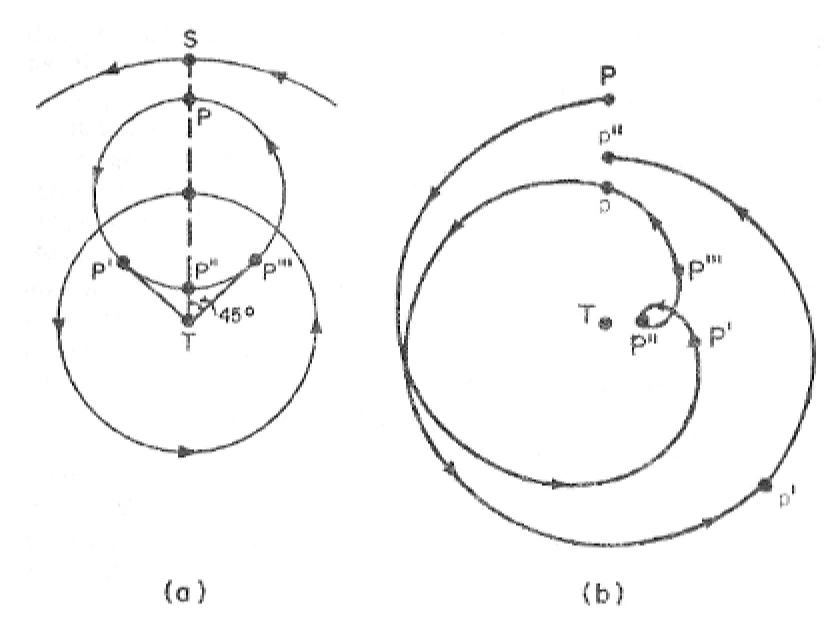


FIGURA 21. — (*a*) Sistema un epiciclo-un deferente para Venus; (*b*) movimiento generado por dicho sistema en el plano de la eclíptica.

El esquema (*a*) presenta las siguientes características: el deferente completa su revolución en un año, de tal forma que si el centro del epiciclo, la tierra *T* y el centro del sol *S* están alineados, seguirán siempre en tal posición y Venus nunca aparecerá demasiado alejado del sol. Los ángulos *STP′* y *STP‴* son los más grandes posibles entre el sol y Venus, y si se introduce la condición de que tales ángulos de máxima elongación sean de 45° quedarán completamente determinadas las dimensiones relativas del epiciclo y del deferente. El epiciclo completa su vuelta cada 584 días, de tal forma que si Venus parte de *P*, cerca del sol, llegará a *P′* (elongación máxima como estrella vespertina) después de 219 días (3/8 de revolución), a *P″* después de 292 días (1/2 revolución), y a *P‴* (elongación máxima como lucero del alba) después de 365 días (5/8 de revolución).

El diagrama (*b*) muestra la trayectoria de Venus provocada por los círculos móviles representados en (*a*). Tal como en el primer diagrama, *P* es el punto de partida, *P′* es la posición ocupada por Venus cuando alcanza su elongación máxima hacia el este (219 días), *P″* es su ubicación cuando llega a mitad de camino en su bucle de retrogradación (292 días), y *P‴* es su posición al alcanzar su elongación máxima hacia el oeste (365 días). El primer viaje de Venus a lo largo de la eclíptica termina en *p* después de 406 días de recorrido, y comprende una retrogradación y dos elongaciones máximas. Su siguiente trayecto (de *p* a *p″* pasando por *p′*) se completa con sólo 295 días y no presenta ninguno de estos fenómenos característicos. En *p′*, Venus está de nuevo en su posición más próxima al sol, posición que alcanza después de una revolución completa del epiciclo (584 días). Ésta es, al menos cualitativamente, una descripción del comportamiento de Venus.

La astronomía ptolemaica

El examen presentado en la sección precedente ilustra el poder y la versatilidad del sistema epiciclo-deferente como método para ordenar y predecir los movimientos de los planetas. Con todo, no se trata más que de un primer paso. Una vez el sistema fue capaz de dar cuenta de las irregularidades más sorprendentes del movimiento planetario —retrogradaciones y desigualdades entre las duraciones de los sucesivos recorridos a lo largo de la eclíptica—, se hizo evidente la existencia de otras anomalías que, si bien de menor importancia, también debían ser tomadas en consideración.

Del mismo modo que el modelo de las dos esferas permitía estudiar de forma detallada las principales irregularidades planetarias al proporcionar un preciso mecanismo para describir los movimientos diurnos de los astros, el sistema epiciclo-deferente, al dar cuenta de los principales movimientos planetarios, permitió aislar observacionalmente una serie de irregularidades de segundo orden. Éste es el primer ejemplo de la fecundidad de dicho

esquema conceptual. Cuando se compara el movimiento predicho por un sistema compuesto por un solo epiciclo y un solo deferente con el movimiento observado de un determinado planeta, se hace patente el hecho de que el planeta no siempre ocupa sobre la eclíptica las posiciones teóricas previstas por la geometría del modelo. Por ejemplo, una cuidadosa observación de Venus nos muestra que no siempre alcanza su desviación máxima de 45° con respecto al sol; los intervalos que separan retrogradaciones sucesivas de un mismo planeta no siempre son exactamente iguales entre sí; ninguno de los planetas, excepción hecha del sol, se mantiene sobre la eclíptica a lo largo de todo su recorrido. Así pues, el sistema de un solo epiciclo asociado a un solo deferente no era la respuesta definitiva al problema de los planetas. Se trataba simplemente de un primer estadio muy prometedor que se abría sobre una perspectiva de desarrollo a corto y a largo plazo. Durante los diecisiete siglos que separan a Hiparco de Copérnico, todos los astrónomos técnicos más creativos se esforzaron en inventar un nuevo conjunto de modificaciones geométricas menores que convirtieran el esquema un epiciclo-un deferente en una base apta para amoldarla a los movimientos observados de los planetas.

La más importante de dichas tentativas en la antigüedad fue llevada a cabo por Ptolomeo (100-178) hacia el año 150 de nuestra era. Actualmente designamos con el nombre de astronomía ptolemaica esta serie de tentativas, de las que la de Ptolomeo constituye el arquetipo, porque su obra reemplazó a la de los predecesores y fue tomada como modelo por todos quienes le siguieron en el estudio de la astronomía, Copérnico entre ellos. La expresión "astronomía ptolemaica" hace referencia a un enfoque tradicional del problema de los planetas, más que a cualquiera de las soluciones putativas sugeridas por el propio Ptolomeo, por sus predecesores o por quienes le sucedieron. Todas y cada una de las soluciones individuales y particularizadas, y en especial la de Ptolomeo, presentan un enorme interés técnico e histórico a un mismo tiempo; sin embargo, tales soluciones particulares y sus vinculaciones históricas son demasiado complejas como para abordar su estudio en la presente obra. En consecuencia, en lugar de intentar dar cuenta del desarrollo general de los diversos sistemas

planetarios ptolemaicos, nos limitaremos a indicar los principales tipos de modificaciones a las que se vio sometido el sistema base un epiciclo-un deferente, desde su invención, tres siglos antes de nuestra era, hasta su abandono por parte de los discípulos de Copérnico.

La aplicación más importante de las principales modificaciones introducidas durante la antigüedad y la Edad Media en el sistema epiciclo-deferente se halla solidariamente vinculada a la resolución de los movimientos complejos de los planetas. Tales modificaciones pueden ser descritas con bastante simplicidad al estudiar su aplicación al movimiento del sol. El sol no retrograda, por lo que una explicación de su movimiento no requiere la introducción de un epiciclo principal del tipo descrito en la sección precedente. Sin embargo, para dar una explicación cuantitativa precisa del movimiento solar no basta con fijarlo a un deferente que gire con movimiento uniforme alrededor de la tierra. En efecto, reexaminando los datos sobre solsticios y equinoccios expuestos en el primer capítulo, se observa de inmediato que el sol emplea seis días más para pasar del equinoccio de primavera al equinoccio de otoño (distantes 180° sobre la eclíptica) que para regresar desde el equinoccio de otoño al equinoccio de primavera (igualmente separados por 180°). El movimiento del sol sobre la eclíptica es ligeramente más rápido en invierno que en verano, y un tal movimiento no puede ser generado por un punto fijo situado sobre un círculo que gire con velocidad constante alrededor del centro de la tierra. Examinemos la figura 22*a*. En ella se muestra a la tierra ocupando el centro de un deferente que gira con velocidad uniforme; se han indicado mediante guiones los puntos equinocciales de primavera y de otoño, *EP* y *EO*, de la esfera de las estrellas. Una rotación uniforme del deferente llevaría al sol *S* desde *EP* a *EO* en el mismo período de tiempo que el empleado para devolverlo desde *EO* a *EP*, los hechos observados muestran que la concordancia con tal esquema es sólo aproximada.

Supongamos ahora que el sol deja de hallarse situado sobre el deferente para ubicarse en un pequeño epiciclo que completa una revolución en dirección oeste mientras el deferente completa la suya en dirección este. La figura 22*b* nos muestra ocho posiciones del sol en un tal sistema.

Evidentemente, la semi-revolución del deferente que corresponde al verano arrastra el sol a lo largo de una distancia inferior a la que separa *EP* de *EO*, mientras que la otra semi-revolución, la correspondiente al invierno, lo hace a través de una distancia superior a la indicada. El efecto del epiciclo es acrecentar el tiempo empleado por el sol para recorrer los 180° que separan a *EP* de *EO* y disminuir el invertido a lo largo de la otra mitad de eclíptica, desde *EO* a *EP*. Si el radio del epiciclo menor es igual a 0,03 veces el radio del deferente, la diferencia entre los tiempos empleados por el sol para describir cada una de las dos mitades de la eclíptica será exactamente de 6 días, el lapso detectado mediante la observación directa.

El epiciclo empleado para corregir estas pequeñas irregularidades del movimiento del sol es de escaso tamaño y no produce bucles retrógrados. Así pues, su función es muy diferente de la de los epiciclos estudiados en la sección precedente y, si bien los astrónomos ptolemaicos jamás la llevaron a cabo, veremos que presenta cierta comodidad establecer una separación entre las funciones de ambos tipos de epiciclos. Denominaremos “epiciclos mayores” a los empleados para explicar las grandes irregularidades, los destinados a producir la apariencia cualitativa del movimiento de retrogradación, y “epiciclos menores” a los círculos complementarios que tienen como finalidad eliminar pequeños desacuerdos cuantitativos entre la teoría y la observación. Todas las versiones del sistema ptolemaico, sistema planetario basado en el uso del epiciclos y deferentes, se veían obligadas a emplear exactamente cinco epiciclos mayores, pues sólo son cinco los planetas que presentan irregularidades importantes tales como movimientos de retrogradación. Por el contrario, el número de epiciclos menores necesarios para dar cuenta de las pequeñas irregularidades cuantitativas depende tan sólo de la precisión de las observaciones disponibles y de la precisión requerida para las previsiones derivadas del sistema. Así pues, el número de epiciclos menores empleados en las diferentes versiones de la astronomía ptolemaica variaba enormemente. Tanto en la antigüedad como en el Renacimiento no es raro encontrar sistemas que empleaban una docena o más de epiciclos menores, pues una adecuada elección de las dimensiones y la velocidad de los mismos permitía explicar casi todo tipo

de pequeñas irregularidades en los movimientos planetarios. Por tal razón, como veremos en páginas subsiguientes, la complejidad del sistema astronómico de Copérnico era prácticamente equiparable a la del ptolemaico. Si bien Copérnico eliminó con su reforma los epiciclos mayores, seguía tan sujeto como sus predecesores al uso de los epiciclos menores.

Un tipo de irregularidad que puede ser tratado con la ayuda de un epiciclo menor se esquematiza en la figura 22*b*; otro distinto aparece en la figura 22*c*. En esta última, el epiciclo menor efectúa dos revoluciones en dirección oeste mientras el deferente completa una sola en dirección este. La combinación de ambas rotaciones tiene como resultado un movimiento total (en trazo discontinuo en la figura) a lo largo de un círculo achatado. Un planeta que se mueva sobre esta curva lo hace a mayor velocidad y pasa menos tiempo en las proximidades de los solsticios de verano y de invierno que en las de los dos equinoccios. Si el epiciclo hubiera recorrido algo menos de dos vueltas mientras el deferente completaba su revolución, los puntos de la eclíptica en los que la velocidad aparente del planeta es la más elevada cambiarían en cada una de las sucesivas vueltas a lo largo de la eclíptica. Si el planeta hubiera presentado su máxima velocidad en las proximidades del solsticio de verano al dar una determinada vuelta a lo largo de la eclíptica, en la vuelta siguiente habría pasado por el punto que marca dicho solsticio antes de haber alcanzado su velocidad máxima. Pueden introducirse otras variaciones del mismo género siempre que se desee.

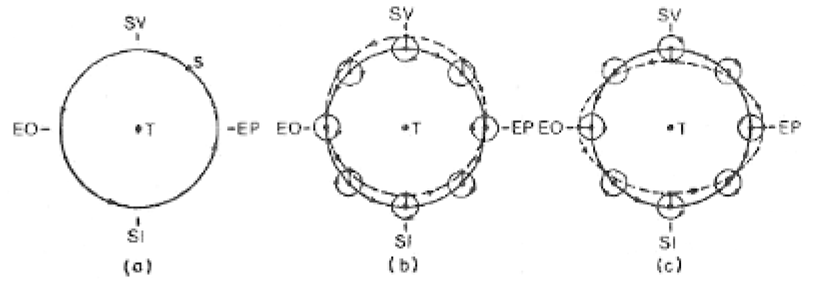


FIGURA 22. — Funciones de un epiciclo menor. En (*a*) el sol, movido por un solo deferente con centro en la tierra, emplea el mismo tiempo para ir de *EO* a *EP* que para retornar de *EP* a *EO*. En (*b*) el movimiento combinado de un deferente y un epiciclo menor arrastra el sol a lo largo de la línea de

trazo discontinuo; se necesita, pues, más tiempo para ir de *EP* a *EO* que para volver de *EO* a *EP*. El diagrama (*c*) muestra la curva que se genera cuando el epiciclo menor gira con una velocidad doble que la supuesta en la elaboración del esquema (*b*).

Por otro lado, las aplicaciones del epiciclo menor no quedan limitadas al caso de los planetas que, como el sol o la luna, no retrogradan. En ciertos casos se coloca un epiciclo menor sobre un epiciclo mayor para poder predecir movimientos planetarios más elaborados. En la figura 23*a* se muestra una tal combinación de un epiciclo sobre un epiciclo, acoplándose el conjunto a un deferente. Si, mientras el deferente completa una revolución, el epiciclo mayor efectúa ocho vueltas hacia el este y el menor una hacia el oeste, el planeta describe a través de la esfera de las estrellas la trayectoria que se representa en la figura 23*b*. Dicha trayectoria presenta ocho bucles retrógrados normales, agrupados de forma algo más densa en la mitad de la eclíptica comprendida entre el equinoccio de primavera y el equinoccio de otoño. Si se dobla la velocidad de rotación del epiciclo menor, la trayectoria seguida por el planeta se achata de forma similar a como se muestra en la figura 22*c*. Estos diagramas son una primera indicación de la complejidad de las trayectorias que pueden producir los epiciclos menores.

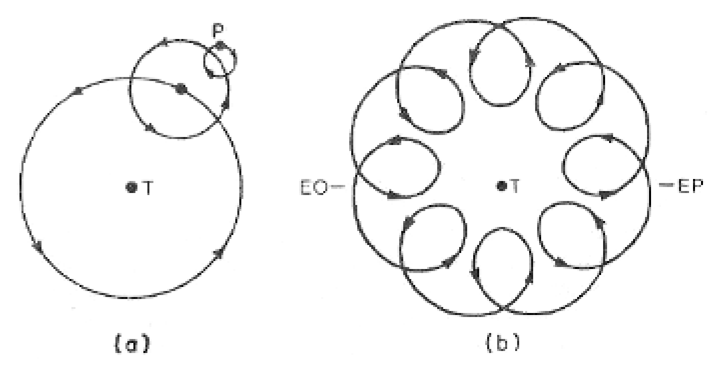


FIGURA 23. — (*a*) Un epiciclo, sobre un epiciclo, sobre un deferente; (*b*) camino típico engendrado en el espacio por tal sistema compuesto de círculos. Para simplificar, se ha representado una curva que se cierra sobre sí misma, situación que no se produce en el movimiento real de los planetas.

El epiciclo menor no es el único dispositivo disponible para corregir las discrepancias de segundo orden entre los sistemas compuestos por un solo epiciclo y un solo deferente y el comportamiento observado de los planetas.

Una simple ojeada a la figura 22*b* nos muestra que el efecto producido por un epiciclo menor que completa una revolución en dirección oeste mientras el deferente da una vuelta hacia el este también puede ser logrado mediante un único deferente cuyo centro se halle desplazado respecto al de la tierra. Un tal círculo desplazado, designado por los astrónomos de la antigüedad con el nombre de excéntrica, se halla representado en la figura 24*a*. Si la distancia entre la tierra, *T*, y el centro *E* de la excéntrica es de alrededor de 0,03 veces el radio de la excéntrica, tal círculo descentrado explicará por qué el sol tarda seis días más de los previstos para trasladarse desde el equinoccio de primavera al equinoccio de otoño; éste es el dispositivo que empleó Ptolomeo para explicar el movimiento del sol. Empleando otros valores distintos de la distancia *TE* junto a un sistema compuesto por uno o varios epiciclos, quedarán explicadas otras irregularidades menores del movimiento de los planetas. Pueden obtenerse efectos suplementarios situando el centro de la excéntrica sobre un pequeño deferente (figura 24*b*) o sobre una segunda excéntrica de menor tamaño (figura 24*c*). Ambos dispositivos son, desde el punto de vista geométrico, respectivamente equivalentes a un epiciclo menor situado sobre un deferente y a un epiciclo menor situado sobre una excéntrica. La mayor parte de los astrónomos ptolemaicos acostumbraban a emplear estos pequeños círculos centrales en detrimento de los epiciclos menores. Sea cual fuere el caso, siempre es posible añadir uno o más epiciclos e inclinar sus planos respectivos de forma conveniente para que den cuenta de las desviaciones de los planetas hacia el norte o el sur de la eclíptica.

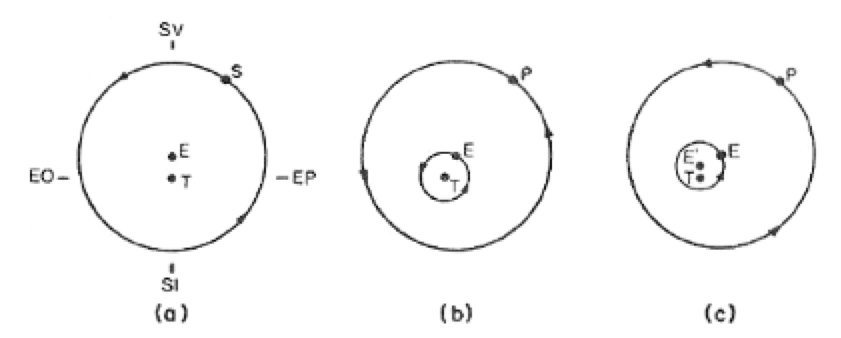


FIGURA 24. — (*a*) Excéntrica; (*b*) excéntrica sobre deferente; (*c*) excéntrica sobre excéntrica.

Aun otro dispositivo, el ecuante, fue utilizado en la antigüedad para intentar reconciliar la teoría de los epiciclos con los resultados obtenidos en cuidadosas observaciones. Tal dispositivo es particularmente importante porque las objeciones estéticas de Copérnico al mismo (capítulo 5) fueron uno de los motivos esenciales que le llevaron a rechazar el sistema de Ptolomeo y a buscar un método de cálculo radicalmente nuevo. Copérnico usaba epiciclos y excéntricas similares a las empleadas por sus predecesores durante la antigüedad. Sin embargo, su sistema no hacía uso de los ecuantes, pensando que la exclusión de tales artificios geométricos era una de las mayores ventajas que presentaba su esquema a la vez que uno de los argumentos de mayor solidez en favor de su veracidad.

La figura 25 ilustra el uso del ecuante en un caso simple. Se trata del ecuante empleado para explicar la irregularidad, ya discutida, que presenta el movimiento del sol. El centro del deferente del sol coincide, como antes, con el centro de la tierra *T*, pero ahora se requiere que la velocidad de rotación del deferente sea uniforme, no alrededor de su centro geométrico *T*, sino alrededor de un punto ecuante *A* desplazado, en este caso, hacia el solsticio de verano. Esto equivale a afirmar que el ángulo α, con vértice en el punto ecuante *A* y extremos en el sol y en el solsticio de verano, debe variar uniformemente con el tiempo. Si el ángulo aumenta 30° en un mes, debe incrementar 30° cada mes de idéntica duración al tomado como referencia. En la figura 25 el sol se halla situado sobre el equinoccio de primavera, *EP*. Para alcanzar el equinoccio de otoño, *EO*, debe describir un semicírculo, con lo que el ángulo α aumentará algo más de 180°; para regresar de *EO* a *EP* debe describir un segundo semicírculo, en el que α aumentará algo menos de 180°. Puesto que para aumentar α en 180° siempre se necesita idéntico lapso temporal, el sol deberá emplear más tiempo para ir desde *EP* a *EO* que para regresar desde *EO* a *EP*. En consecuencia, observado desde el punto ecuante *A*, el sol no viaja con velocidad constante, acelerándose en las proximidades del solsticio de invierno y desacelerándose en las del solsticio de verano.

Acabamos de exponer el rasgo distintivo que define al ecuante. La velocidad de rotación de un deferente, o la de cualquier otro círculo

planetario, debe ser uniforme, no respecto a su centro geométrico, sino respecto a un punto ecuante distinto de aquél. Si se observa desde el centro geométrico de su deferente, el planeta parece moverse con velocidad no uniforme y de manera excéntrica. Debido a esta excentricidad Copérnico abrazó la opinión de que el ecuante no era un dispositivo legítimo para ser aplicado a la astronomía. Según él, las irregularidades aparentes de la rotación eran violaciones de la simetría circular uniforme que convertía al sistema compuesto por epiciclos, deferentes y excéntricas en algo tan plausible y seductor. Dado que con bastante frecuencia se aplicaba el ecuante también a las excéntricas y que dispositivos similares hacían que a veces el epiciclo se moviese de manera excéntrica, es fácil comprender qué vías de razonamiento llevaron a Copérnico a considerar que tal aspecto de la astronomía ptolemaica poseía un carácter monstruoso.

Los dispositivos matemáticos esbozados en páginas precedentes no se desarrollaron al unísono, ni se deben todos ellos al genio de Ptolomeo. Apolonio, en el siglo III antes de nuestra era, conocía los epiciclos mayores (figura 19*a*) y las excéntricas con centro móvil (figura 24*b*). En el siglo siguiente, Hiparco añadió al arsenal de los métodos astronómicos los epiciclos menores y las excéntricas con centro fijo (figura 24*a*), a la vez que combinó tales dispositivos con el fin de proporcionar una primera evaluación cuantitativa de las irregularidades de los movimientos del sol y de la luna. El propio Ptolomeo fue quien añadió el ecuante y, durante los trece siglos que le separan de Copérnico, tanto los astrónomos árabes como los europeos emplearon nuevas y distintas combinaciones de círculos —entre ellas la adaptación de un epiciclo sobre otro epiciclo (figura 23*a*) y la de una excéntrica a una excéntrica (figura 24*c*)— para explicar las irregularidades aún no resueltas de los movimientos planetarios.

Con todo, no hay duda alguna de que la contribución de Ptolomeo es la más descollante. Es, pues, con justicia, que se asocia su nombre a toda esta técnica para resolver el problema de los planetas, ya que fue él quien por primera vez reunió una particular combinación de círculos que explicaba, no sólo los movimientos del sol y de la luna, sino también las regularidades e irregularidades cuantitativas observadas en los movimientos aparentes de

los siete planetas. Su *Almagesto*, donde se recopila la parte esencial de los logros de la astronomía antigua, fue el primer tratado matemático sistemático que daba una explicación *completa, detallada* y *cuantitativa* de todos los movimientos celestes. Sus resultados fueron de tal precisión y los métodos que empleó gozaron de tal poder de resolución que el problema de los planetas tomó un sesgo completamente nuevo a partir de Ptolomeo. Los sucesores de Ptolomeo, con el fin de acrecentar la precisión o la simplicidad de la teoría planetaria, asociaron epiciclos a los epiciclos y excéntricas a las excéntricas, explotando la inmensa versatilidad de las bases técnicas cimentadas por el gran astrónomo. Sin embargo, raramente se aventuraron a introducir modificaciones fundamentales en la técnica ptolemaica. El problema de los planetas se había convertido en una simple cuestión de disposición de los diversos elementos que entraban en juego, problema que se atacaba básicamente a través de una redistribución de los mismos. La pregunta que se planteaban los astrónomos era: ¿qué combinación particular de deferentes, excéntricas, ecuantes y epiciclos puede explicar los movimientos planetarios con la mayor simplicidad y precisión?

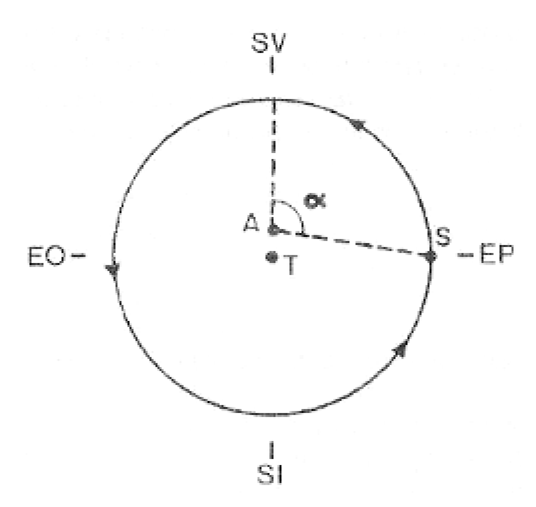


FIGURA 25. — El ecuante. El sol *S* se desplaza a lo largo de un círculo centrado en la tierra, pero lo hace con velocidad variable determinada por la condición de que el ángulo α gire uniformemente en función del tiempo.

No podemos ofrecer una exposición exhaustiva de las diversas soluciones cuantitativas dadas al problema por Hiparco, por Ptolomeo o por sus sucesores. Los sistemas cuantitativos completos son de una enorme

complejidad desde el punto de vista matemático. Gran parte del *Almagesto* de Ptolomeo está formado por tablas trigonométricas, diagramas, fórmulas, demostraciones, extensos cálculos ilustrativos y largas listas de observaciones. No obstante, los problemas que llevaron a Copérnico a buscar un nuevo enfoque para el problema de los planetas y la superioridad que atribuía a su nuevo sistema se encuentran contenidos en este abstruso *corpus* teórico cuantitativo. Copérnico no atacó el universo de las dos esferas, aunque su obra, acabara derrumbándolo, ni tampoco abandonó el uso de epiciclos y excéntricas, aditamentos dejados de lado por sus sucesores. Lo que atacó Copérnico, y por ahí es por donde se inicia la revolución astronómica, fueron ciertos detalles matemáticos aparentemente triviales, tales como los ecuantes, que formaban parte de los complejos sistemas matemáticos de Ptolomeo y de sus sucesores. La primera batalla entre Copérnico y los astrónomos de la antigüedad se libró en torno a una serie de minucias técnicas tales como las abordadas en la presente sección.

LA ANATOMÍA DE LA CREENCIA CIENTÍFICA

Por su sutilidad, flexibilidad, complejidad y potencia, la técnica del epiciclo-deferente que acabamos de esbozar no ha tenido parangón posible dentro de la historia de las ciencias hasta fecha muy reciente. En su forma más elaborada, el sistema de las combinaciones de círculos era un logro asombroso. *Sin embargo, jamás funcionó demasiado bien*. La concepción inicial de Apolonio resolvía las irregularidades planetarias de mayor envergadura —movimiento retrógrado, variación del brillo, desigualdad entre los períodos de tiempo requeridos para las sucesivas trayectorias a lo largo de la eclíptica— con simplicidad y de un solo golpe. No obstante, también puso de manifiesto una serie de irregularidades secundarias, algunas de las cuales encontraron explicación en el marco del sistema más elaborado que desarrolló Hiparco; con todo, la teoría aún no se ajustaba a los resultados observacionales. Tampoco la compleja combinación de excéntricas, epiciclos y ecuantes propuesta por Ptolomeo conseguía

reconciliar de forma precisa teoría y observación. El sistema de Ptolomeo no fue ni el más complejo ni una versión última y definitiva en tal línea teórica. Sus numerosos sucesores, primero en el seno del mundo árabe y posteriormente dentro de la Europa medieval, hicieron frente al problema donde él lo había dejado, buscando en vano la solución que se le había escapado al astrónomo griego. Copérnico todavía se debatía con el mismo problema.

Existen numerosas variantes del sistema de Ptolomeo derivadas de la que el gran astrónomo presentó en su *Almagesto*, algunas de las cuales alcanzaron una notabilísima precisión en la predicción de las posiciones de los planetas. Sin embargo, tal aumento en precisión se obtuvo al costo de un aumento en la complejidad del sistema gracias a la adición de nuevos epiciclos menores o de dispositivos equivalentes, y este aumento en la complejidad procuró solamente un mayor acercamiento a los movimientos planetarios, no una finalidad. Ninguna de las versiones del sistema pudo superar con completo éxito la prueba de nuevas y más precisas observaciones, y este fracaso, junto a la paulatina desaparición de la economía conceptual que había hecho tan convincentes las versiones más toscas del universo de las dos esferas, condujo finalmente a la revolución copernicana.

No obstante, el advenimiento de la revolución se hizo esperar de forma increíble. Durante casi dieciocho siglos, los que separan la época de Apolonio e Hiparco de la de Copérnico, la idea de un universo centrado en la tierra y compuesto por una serie de órbitas circulares dominó cualquier ataque técnico al problema de los planetas; ataques que, por cierto, no escasearon con anterioridad al del propio Copérnico. Aun a despecho de su ligera aunque reconocida inexactitud y de su asombrosa falta de economía (que contrasta con la simplicidad del universo de las dos esferas descrito en el capítulo 1), el sistema perfeccionado por Ptolomeo gozó de una muy considerable longevidad. La larga vida de este admirable pero manifiestamente imperfecto sistema plantea dos paradójicos problemas estrechamente vinculados entre sí. ¿Cómo pudieron ejercer tan gran influencia sobre la imaginación de los astrónomos el universo de las dos

esferas y la teoría planetaria del epiciclo-deferente asociada con él? Y, dando por supuesta tal situación, ¿cómo perdió su dominio psicológico este enfoque tradicional a un tradicional problema? Dicho de forma más directa: ¿por qué se retrasó tanto el advenimiento de la revolución copernicana?, ¿cómo fue posible su eclosión?

Tales preguntas conciernen a la historia de un particular conjunto de ideas, y como tal serán examinadas con detalle en páginas sucesivas. Sin embargo, también conciernen, de forma más general, a la naturaleza y estructura de los esquemas conceptuales y al proceso mediante el cual uno de tales esquemas se ve reemplazado por otro. Por otro lado, podremos arrojar luz sobre nuestro análisis si comenzamos por abordar brevemente las categorías abstractas, lógicas y psicológicas, introducidas en la penúltima sección del primer capítulo. Allí sometíamos a examen las funciones desempeñadas por un esquema conceptual. Podemos preguntarnos ahora por qué un esquema que, como el primitivo universo de las dos esferas, funciona con fluidez puede verse reemplazado. Examinemos ante todo la lógica del fenómeno.

Desde el punto de vista lógico, siempre existen numerosos esquemas conceptuales concurrentes capaces de ordenar cualquier conjunto *definido* de observaciones. Sin embargo, tales esquemas difieren entre sí en lo concerniente a la previsión de fenómenos que no forman parte del conjunto de datos inicial. Tanto el sistema copernicano como el newtoniano explican los resultados de las observaciones a simple vista del sol y de las estrellas con idéntica eficacia a como lo hace el sistema de las dos esferas; lo mismo puede decirse del sistema de Heráclides o del de Tycho Brahe, sucesor de Copérnico. Al menos en teoría, existe un número infinito de alternativas distintas que cumplen con idéntica eficacia que las anteriores. Pero estas alternativas concuerdan principalmente en cuanto a observaciones ya efectuadas, y no explican de la misma manera todas las observaciones posibles. Por ejemplo, el sistema copernicano difiere del universo de las dos esferas en que aquél prevé un movimiento anual aparente de las estrellas, en que atribuye a la esfera estelar un diámetro mucho más grande y en que sugiere (a pesar de que no lo hiciera el propio Copérnico) un nuevo tipo de

solución para el problema de los planetas. Es en función de diferencias tales como las que acabamos de indicar (y otras muchas) por lo que un científico debe creer en su sistema antes de concederle su confianza como guía en la fructífera investigación de lo *desconocido*. Una sola de las diferentes alternativas puede representar la realidad *de forma concebible*, y el científico que explora un nuevo dominio debe sentirse seguro de la que ha escogido o de que, como mínimo, ha elegido la que más se aproxima de entre todas las que se hallan a su disposición. Pero el científico debe pagar un precio por su adhesión a una alternativa en particular: la posibilidad de equivocarse. Una sola observación incompatible con su teoría demuestra que ha venido usando una teoría falsa desde el primer momento. En tal caso, debe abandonar su esquema conceptual y reemplazarlo por otro.

Tal es, a grandes rasgos, la estructura lógica de una revolución científica. Un esquema conceptual en el que se cree porque es económico, fecundo y satisfactorio desde el punto de vista de la cosmología conduce finalmente a una serie de resultados incompatibles con la observación; debe entonces renunciarse a creer en él y adoptar una teoría que lo reemplace; acto seguido, comienza de nuevo el proceso. Se trata de un croquis útil, pues la incompatibilidad entre teoría y observación es la fuente última de toda revolución en el campo de las ciencias. No obstante, desde el punto de vista histórico, el proceso revolucionario jamás es, y es imposible que sea, tan simple como indica la lógica de dicho croquis. Tal como ya hemos empezado a descubrir, la observación jamás es *absolutamente* incompatible con un esquema conceptual.

Para Copérnico, el movimiento de los planetas era incompatible con el universo de las dos esferas, y opinaba que, al añadir más y más círculos, sus predecesores no habían hecho más que remendar y extender el sistema de Ptolomeo para adecuarlo a las observaciones efectuadas. Creía que la propia necesidad de remendarlo era un claro indicio de que se requería un enfoque radicalmente nuevo. Sin embargo, los predecesores de Copérnico, que disponían exactamente de los mismos medios instrumentales y de idénticas observaciones, habían evaluado la misma situación de forma muy diferente. Los que para Copérnico eran remiendos y extensiones, para sus antecesores

constituían un proceso natural de adaptación y ampliación comparable al que, en una época anterior, había servido para introducir el movimiento del sol en el marco del universo de las dos esferas, inicialmente concebido para albergar tan sólo a la tierra y a las estrellas. Los predecesores de Copérnico estaban seguros de que dicho sistema acabaría por funcionar.

Resumamos. Si bien no hay duda alguna de que los científicos abandonan un esquema conceptual cuando parece hallarse en irreductible conflicto con la observación, el énfasis sobre la incompatibilidad lógica enmascara un problema esencial. ¿Qué es lo que transforma en inevitable conflicto una discrepancia aparentemente provisional? ¿Cómo puede un esquema conceptual, admirado y descrito por una generación como sutil, flexible y complejo, convertirse en algo ambiguo, oscuro y embarazoso para la generación siguiente? ¿Por qué los científicos apoyan determinadas teorías a despecho de las discrepancias y por qué, habiéndolas sostenido, deciden abandonarlas? Estos problemas afectan a la anatomía de la creencia científica y constituirán el material básico de los dos próximos capítulos, donde se prepara el estudio de la revolución copernicana propiamente dicha.

Sin embargo, nuestro problema inmediato es analizar la huella dejada sobre el espíritu humano por la antigua tradición de la investigación astronómica. ¿Cómo una tal tradición ha podido imponer un determinado conjunto de surcos mentales que han guiado la imaginación de los astrónomos, limitado las nociones utilizables en el domino de la investigación, dificultado la concepción de ciertos tipos de innovaciones y, aún en mayor grado, su subsiguiente aceptación? Ya hemos señalado, al menos de forma implícita, los aspectos estrictamente astronómicos de este problema. El universo de las dos esferas y la técnica del epiciclo-deferente a él asociada eran originariamente muy económicos y fecundos. Sus primeros éxitos parecían garantizar la solidez fundamental de tal enfoque; parecía obvio que sólo serían necesarias algunas modificaciones menores para ajustar las previsiones matemáticas a la observación. Es difícil romper una convicción de este tipo, en especial cuando ha quedado entronizada en la práctica general por una generación de astrónomos que la transmite a sus

sucesores a través de sus enseñanzas y escritos. Se trata del “Donde-va-Vicente-donde-va-la-gente” de las ideas científicas.

No obstante, esta comparación no basta para explicar de forma completa y coherente la fuerza de la tradición astronómica. Al intentar completar la explicación, nos alejaremos provisionalmente de los problemas astronómicos propiamente dichos. El universo de las dos esferas fue un guía muy útil para intentar la resolución de los problemas tanto interiores como exteriores que tenía planteados la astronomía. Hacia finales del siglo IV antes de nuestra era, se aplicó no sólo a los planetas, sino también a problemas terrestres, tales como la caída de una hoja o el vuelo de una flecha, y problemas espirituales, como el de la relación del hombre con sus dioses. (Sí el universo de las dos esferas, y en particular la idea de una tierra central e inmóvil, parecía ser por aquel entonces el ineludible punto de partida para toda investigación de carácter astronómico, se debía ante todo a que el astrónomo no podía alterar en sus bases el universo de las dos esferas sin que a un mismo tiempo se subvirtieran tanto la física como la religión. Los conceptos astronómicos fundamentales habían pasado a ser fibras de un tejido mucho más complejo y vasto que la propia astronomía. En tal situación, los elementos de carácter no astronómico podían llegar a ser tan responsables como los propiamente astronómicos del encadenamiento de la imaginación de los astrónomos. La historia de la revolución copernicana no es, pues, simplemente una historia de astrónomos y de cielos.

Capítulo 3

EL UNIVERSO DE LAS DOS ESFERAS EN EL MARCO DEL PENSAMIENTO ARISTOTÉLICO

EL UNIVERSO ARISTOTÉLICO

Para examinar la antigua concepción del mundo en la que los conceptos, pertenecieran o no al dominio astronómico, se entremezclaban para formar un único y coherente conjunto de ideas, debemos invertir el orden cronológico y, por un momento, volver a mediados del siglo IV antes de nuestra era. Por aquel entonces apenas se comenzaba a atacar el problema de los planetas con una técnica medianamente elaborada, pero la cosmología de las dos esferas, que guiaba las investigaciones matemáticas de los astrónomos planetarios de la época, ya había adquirido una serie de funciones esenciales al margen del campo astronómico. Gran parte de ellas pueden ser descubiertas en la voluminosa obra del gran filósofo y científico griego Aristóteles (384-322 antes de nuestra era), cuyas opiniones tuvieron una inmensa influencia y constituyeron, con el paso del tiempo, el punto de partida para la mayor parte del pensamiento cosmológico medieval y gran parte del renacentista.

La obra de Aristóteles, que ha llegado hasta nosotros de forma bastante imperfecta y fragmentaria, trata de materias científicas a las que actualmente designamos bajo los nombres de física, química, astronomía, biología y medicina, así como de materias al margen de la ciencia, como la

lógica, metafísica, política, retórica y crítica literaria. En cada una de tales disciplinas, especialmente en biología, lógica y metafísica, Aristóteles aportaba ideas enteramente originales. Sin embargo, más importante aún que sus substanciales contribuciones a una amplia gama de dominios, fue su intento de organizar en un todo sistemático y coherente el saber de la época. No es difícil encontrar incoherencias en la obra de Aristóteles, ni, incluso, esporádicas y flagrantes contradicciones, aunque, con todo, su visión del hombre y del universo presente una unidad fundamental y jamás desde entonces haya sido llevada a cabo una síntesis comparable a la suya en cuanto a extensión y originalidad. Ésta es una de las razones por las que sus escritos han gozado de una influencia tan inmensa; al final del presente capítulo fijaremos nuestra atención sobre algunas otras. Ante todo debemos intentar esbozar brevemente la estructura del propio universo aristotélico para, más adelante, examinar de forma más detallada las múltiples funciones atribuidas a las esferas terrestre y celeste en el pensamiento aristotélico.

Para Aristóteles, el universo entero estaba contenido en la esfera de las estrellas o, más exactamente, dentro de la superficie externa de dicha esfera. En todos y cada uno de los puntos del interior de la esfera había materia; los agujeros y el vacío no tenían razón de ser en el universo de Aristóteles. En el exterior de la esfera no había nada, ni materia, ni espacio; nada absolutamente. En la ciencia aristotélica, materia y espacio van juntos; son dos aspectos de un mismo fenómeno y, por consiguiente, la propia noción de vacío es completamente absurda. A través de este presupuesto, Aristóteles daba explicación al tamaño finito y a la unicidad del universo. Espacio y materia deben acabar a un mismo tiempo: no tiene sentido construir un muro que limite el universo y preguntarse acto seguido qué es lo que limita el muro. Dice Aristóteles en su tratado *Del cielo*:

[…] así pues, queda claro que fuera del cielo no existe ni puede existir la masa de ningún cuerpo. La totalidad del mundo está integrada por toda la materia disponible […] Por tanto, ni existen ahora varios cielos, ni existieron antes, ni pueden existir; antes bien, este cielo es único y perfecto.

Además, es evidente que fuera del cielo no hay ni lugar, ni vacío […], pues en todo lugar existe la posibilidad de que haya un cuerpo y, por otra parte, el vacío se define como aquello que, aunque ahora no lo contenga, puede albergar un cuerpo […].[3.1]

Lo mismo que el universo de Platón, parte del cual hemos descrito brevemente en el primer capítulo, el universo aristotélico se contiene a sí mismo y es autosuficiente; no deja nada fuera de sus límites. Pero Aristóteles diferencia con mucho más detalle que Platón la constitución del interior del universo. El universo aristotélico está lleno en su mayor parte por un solo elemento, el éter, que se agrega en un conjunto de caparazones homocéntricos para formar una gigantesca esfera hueca, limitada en su parte exterior por la superficie de la esfera de las estrellas y en la interior por la superficie de la esfera homocéntrica que arrastra al planeta más bajo, la luna. El éter es el elemento celeste, un sólido cristalino, según Aristóteles, aunque este último extremo fue con frecuencia puesto en duda por sus sucesores. A diferencia de las substancias que se conocen sobre la tierra, el éter es puro e inalterable, transparente y sin peso. Los planetas y las estrellas, así como los caparazones esféricos concéntricos cuya rotación explica los movimientos celestes, están hechos de éter.

Entre la época de Aristóteles y la de Copérnico estuvieron en boga un gran número de conceptos diversos acerca de la forma y la realidad física de las esferas celestes que movían los cielos, siendo el aristotélico el más explícito y detallado de todos ellos. Según Aristóteles, había exactamente cincuenta y cinco caparazones cristalinos de éter y éstos encerraban en un mecanismo físico el sistema matemático de las esferas homocéntricas elaborado por Eudoxo y Calipo, su sucesor. Aristóteles casi duplicaba el número de esferas empleadas por los primeros matemáticos, pero las que él añadía eran totalmente superfluas desde el punto de vista matemático. Su única función era la de proporcionar los lazos mecánicos necesarios para mantener en rotación todo el conjunto de los caparazones concéntricos, es decir, transformaba el conjunto de esferas en una pieza de relojería celeste impulsada por la esfera de las estrellas. Puesto que el universo estaba lleno,

todas las esferas se encontraban en contacto, y el frotamiento de unas con otras transmitía movimiento a todo el sistema. La esfera de las estrellas arrastraba a la que se hallaba más cerca, el más exterior de los siete caparazones homocéntricos, el que lleva consigo a Saturno. Este caparazón arrastraba a su vecino interno más próximo en el conjunto de Saturno, y así sucesivamente, hasta que el movimiento era por fin transmitido a la esfera más baja del conjunto, la responsable del movimiento de la luna. Esta última esfera es el más interior de los caparazones etéreos, el límite inferior de la región celeste o supralunar.

El sistema de epiciclos y deferentes, sustituto de las esferas homocéntricas por razones de índole matemática, no se adaptaba demasiado bien a las esferas cristalinas propuestas por Aristóteles, por lo que a partir del siglo IV antes de nuestra era toda tentativa de dar una explicación *mecánica* a los movimientos epicíclicos quedó bastante al margen de la problemática planetaria general, poniéndose en entredicho, con cierta frecuencia, la existencia real de las esferas cristalinas. Por ejemplo, el *Almagesto* no indica con claridad si Ptolomeo creía de una u otra forma en ellas. Sea como fuere, parece que a lo largo del período que separa las vidas de Ptolomeo y Copérnico la mayor parte de las gentes cultivadas, entre las que cabe incluir a los astrónomos, creían, como mínimo, en una versión bastarda de las esferas de Aristóteles. Se aceptaba la existencia de un caparazón esférico para las estrellas y uno para cada planeta, suponiéndose que el espesor de cada uno de los caparazones planetarios era tal que el planeta se situaba sobre su superficie interna cuando se encontraba en la posición más próxima a la tierra y sobre su superficie exterior cuando estaba más alejado de ella. Estas ocho esferas estaban encajadas una dentro de otra y en su conjunto llenaban por completo la región celeste. El movimiento de la esfera estelar proporcionaba una explicación precisa de las trayectorias diurnas de las estrellas, mientras la rotación continua de las siete esferas planetarias *solamente* daba cuenta del movimiento medio de los planetas. Quienes no conocían las irregularidades de los movimientos planetarios o se desinteresaban por ellas podían tomar casi al pie de la letra el símil de las esferas de gran espesor en cuyo seno estaba fijado el planeta.

Los astrónomos dedicados al estudio de los movimientos planetarios se servían de epiciclos, deferentes y excéntricas para explicar el movimiento de cada planeta en el interior de su propia cáscara. En general, para ellos los caparazones tenían una realidad como mínimo metafórica, pero en raras ocasiones se preocuparon por encontrar una explicación física al movimiento de un planeta dentro de su esfera.

Algo más de cinco siglos después de la muerte de Aristóteles, la idea de los caparazones de gran espesor engranados entre sí añadió un nuevo e importante elemento técnico a la astronomía postptolemaica al permitir a los astrónomos calcular las dimensiones reales de las esferas planetarias y, por consiguiente, las del universo. Las observaciones del movimiento de un planeta a través de las estrellas permiten al astrónomo determinar tan sólo las *dimensiones relativas* de su epiciclo y de su deferente o su *excentricidad relativa*. Una contracción o una dilatación del sistema de círculos de un determinado planeta no cambia la posición en la que éste aparece proyectado sobre la eclíptica, siempre que las dimensiones relativas del epiciclo, el deferente y la excéntrica, se mantengan constantes. Por otro lado, si cada caparazón esférico debe ser lo suficientemente grueso como para contener el planeta que arrastra consigo, tanto cuando está en su posición más próxima a la tierra como cuando está lo más lejos posible de ella, basta conocer las dimensiones relativas del epiciclo, el deferente y la excéntrica para determinar la razón existente entre los diámetros interior y exterior de cada esfera. Además, si las esferas encajan unas dentro de otras de tal forma que llenan por completo la región celeste, el diámetro exterior de una de ellas debe ser igual al diámetro interior de la que le sigue, con lo que pueden ser calculadas las distancias relativas que existen desde la tierra a las superficies limítrofes de todos y cada uno de los caparazones. Finalmente, estas distancias relativas pueden ser transformadas en absolutas si utilizamos como valor de referencia la distancia desde la tierra a la esfera de la luna, valor que fue determinado en el siglo II antes de nuestra era siguiendo el método que se expone en la sección 4 del Apéndice técnico.

Las estimaciones de dimensiones fundamentadas en la concepción de esferas que llenan totalmente el espacio y que son exactamente lo bastante

grandes como para contener en su seno el conjunto de epiciclos y otros círculos atribuidos a cada planeta no aparecen en la literatura astronómica hasta después de la muerte de Ptolomeo, muy probablemente porque los primeros astrónomos planetarios eran bastante escépticos respecto a la existencia real de tales esferas. Sin embargo, a partir del siglo V de nuestra era se convirtieron en moneda al uso estimaciones de este orden, colaborando una vez más en hacer aparecer como real todo el conjunto cosmológico en el que se fundamentaban. Una lista ampliamente extendida de las dimensiones cosmológicas se debe al astrónomo árabe Al Fargani, quien vivió en el siglo IX de nuestra era. Según sus cálculos, la superficie externa de la esfera de la luna estaba situada a una distancia del centro del mundo equivalente a 64 veces y un sexto el radio de la tierra, la superficie externa de la esfera de Mercurio a 167 veces dicho radio, la de Venus a 1.120 veces, la del sol a 1.220, la de Marte a 8.867, la de Júpiter a 14.405 y, finalmente, la de Saturno a 20.110 veces. Puesto que Al Fargani estimaba que el radio de la tierra era de 3.250 millas romanas, la esfera de las estrellas quedaba situada a más de 75 millones de millas de la tierra. Se trata de una distancia considerable, pero según las modernas teorías cosmológicas es inferior en un millón de veces a la distancia existente entre la tierra y la estrella más próxima a nuestro planeta.

Una ojeada sobre las medidas dadas por Al Fargani pone de manifiesto que la región terrestre, es decir, el espacio situado por debajo de la esfera de la luna, no es más que una ínfima parte del universo. El cielo ocupa la mayor parte del espacio, y casi toda la materia contenida en éste es el éter de las esferas cristalinas. A pesar de todo, las pequeñas dimensiones de la región sublunar no le restan importancia. En la versión del propio Aristóteles, y de forma aún mucho más acusada en la revisión cristiana de la cosmología aristotélica efectuada en la Edad Media, este minúsculo punto situado en el centro del universo es la semilla de que nace todo lo restante. Son los dominios del hombre, y el carácter de esta región es muy distinto al de las regiones celestes situadas por encima de nuestro planeta.

La región sublunar está totalmente ocupada, no por uno, sino por cuatro elementos (o, según textos posteriores, por algún otro pequeño número de

ellos), y su distribución, si bien simple en teoría, es de hecho en extremo compleja. Según las leyes aristotélicas del movimiento, de las que hablaremos más adelante, en ausencia de empujes o atracciones exteriores, dichos elementos se ordenarían en una serie de caparazones concéntricos de modo similar a como se distribuyen las esferas de éter del quinto elemento que los envuelve. La tierra, el elemento más pesado, se colocaría naturalmente en la esfera que constituyese el centro geométrico del universo. El agua, elemento también pesado, aunque menos que la tierra, constituiría una envoltura esférica alrededor de la región central ocupada por la tierra. El fuego, el más ligero de los elementos, se elevaría espontáneamente para constituir su propia esfera justo por debajo de la luna. Y el aire, elemento asimismo ligero, completaría la estructura conformando una esfera que llenara el hueco existente entre el agua y el fuego. Una vez alcanzadas dichas posiciones, los elementos permanecerían en reposo manteniendo toda su pureza como tales. Abandonada a sí misma, es decir, sin la acción de fuerzas exteriores que turben el esquema, la región sublunar sería una región estática, reflejo de la estructura propia de las esferas celestes.

Sin embargo, la región terrestre jamás está en calma. Limitada en su parte superior por la esfera en movimiento de la luna, el movimiento de tal frontera impulsa sin cesar a la capa de fuego situada inmediatamente por debajo de ella, estableciendo de este modo una serie de corrientes que empujan y entremezclan los restantes elementos a lo largo y ancho de todo el mundo sublunar. En consecuencia, nunca nos es dado contemplar los diversos elementos en su forma pura, pues la continua cadena de movimientos que deriva, de forma inmediata, de la esfera lunar y, en último término, de la esfera de las estrellas, hace que siempre los encontremos entremezclados según variadas y variables proporciones. A pesar de todo, la estructura de los diferentes caparazones es bastante aproximada a la ideal, predominando en cada una de las regiones el elemento propio de la misma. Por otro lado, cada elemento contiene como mínimo trazas de los restantes, con lo que queda transformado su carácter y se da nacimiento, según sean las proporciones de la mezcla, a las diversas substancias que se encuentran

sobre nuestro planeta. Así pues, los movimientos del cielo están en el origen de todo cambio y de casi toda la diversidad que podemos observar en el mundo sublunar.

Es en tal universo aristotélico, cuyo alcance y adecuación apenas pueden entreverse en la somera descripción del mismo que acabamos de ofrecer, donde debemos buscar la fuerza de la tradición astronómica precopernicana. ¿Por qué, a pesar de las dificultades reales planteadas por el sistema ptolemaico, los astrónomos han continuado afirmando durante tantos siglos que la tierra ocupaba el centro del universo, o como mínimo el de las órbitas planetarias medias? Una respuesta familiar a tal pregunta aparece ante nuestros ojos sin dificultad alguna: Aristóteles, el gran científico-filósofo de la antigüedad, había proclamado la inmovilidad de la tierra, y su afirmación había sido tomada muy en serio por sus sucesores, para la mayor parte de los cuales se convirtió en “el Filósofo”, la máxima e indiscutible autoridad en todas las cuestiones científicas y cosmológicas.

Con todo, la autoridad de Aristóteles, a pesar de su indiscutible importancia, es sólo el comienzo de una respuesta, pues muchas de las afirmaciones del gran filósofo griego fueron rechazadas sin dificultad alguna por quienes le siguieron por los caminos de la ciencia y la filosofía. En el mundo antiguo existieron otras escuelas de pensamiento científico y cosmológico aparentemente poco influenciadas por la obra de Aristóteles. Durante los últimos siglos de la Edad Media, cuando Aristóteles se convirtió realmente en la autoridad dominante en materia científica, algunos espíritus cultivados no vacilaron en introducir cambios drásticos en un buen número de puntos aislados de su doctrina. La lista de las alteraciones introducidas por los últimos aristotélicos en las enseñanzas originales del maestro es casi ilimitada, y algunos de tales cambios están muy lejos de ser triviales. Veremos en el próximo capítulo que algunas de las críticas dirigidas a Aristóteles por sus sucesores desempeñaron un papel directo y causal en la revolución copernicana.

A pesar de todo, ninguno de los últimos aristotélicos llegó a sugerir que la tierra fuera un planeta o que ésta no fuera el centro del universo. Una tal innovación se reveló particularmente difícil de comprender o de admitir

para cualquier discípulo de Aristóteles, pues la idea de una tierra central y única se entretejía con fuerza en el seno de un vasto conjunto de conceptos que sustentaban el armazón del edificio del pensamiento aristotélico. Puede construirse un universo aristotélico con tres o cinco elementos terrestres tan bien como con los cuatro propugnados por el propio Aristóteles; también es posible sustentarlo sobre la teoría de los epiciclos casi tan bien como sobre las esferas homocéntricas; sin embargo, el universo de Aristóteles no puede resistir, como de hecho no resistió, la modificación que convierte a la tierra en un planeta. Copérnico intentó concebir un universo esencialmente aristotélico alrededor de una tierra en movimiento, pero fracasó en su intento. Sus sucesores captaron en todo su alcance la innovación copernicana y, al obrar en consecuencia, hundieron por completo el magno edificio cosmológico erigido por Aristóteles. La idea de una tierra central e inmóvil era uno de los pocos grandes conceptos básicos sobre los que gravitaba una visión coherente y globalizadora de un determinado sistema del mundo.

LAS LEYES ARISTOTÉLICAS DEL MOVIMIENTO

La explicación dada por Aristóteles al movimiento terrestre proporciona un primer ejemplo de la integración en un todo del pensamiento astronómico y el no astronómico. Ya hemos indicado anteriormente que Aristóteles creía que, en ausencia de impulsos exteriores provinentes en último término del cielo, todos y cada uno de los elementos terrestres permanecerían en reposo en la región sublunar que les era propia. La tierra, naturalmente, en el centro, el fuego en la periferia, y así sucesivamente. De hecho, los elementos y los cuerpos que conforman se ven constantemente arrancados de sus ubicaciones naturales. Pero para ello es necesaria la intervención de una fuerza; todo elemento se resiste a desplazarse y, cuando lo hace, siempre intenta volver a su posición natural a través del camino más corto posible. Así, cuando tomamos en nuestras manos una roca o cualquier otro material terrestre, percibimos cómo tira hacia abajo con

fuerza en un intento por alejarse del lugar que está ocupando y recobrar su posición natural en el centro geométrico del universo; del mismo modo, en una noche despejada, nos es dado ver cómo las llamas de una hoguera forcejean y hacen todo lo posible por recuperar su lugar natural en la periferia de la región sublunar.

Más adelante examinaremos las fuentes psicológicas y la fuerza persuasiva que posee la explicación aristotélica del movimiento terrestre. Pero antes de abordar dichos aspectos, veamos lo que tales teorías, extraídas de la física terrestre, aportan al astrónomo cuya cosmología admite un universo situado alrededor de una tierra central. En un importante pasaje del tratado *Del cielo*, Aristóteles deriva de las mismas la esfericidad, la estabilidad y la posición ocupada por la tierra. Anteriormente hemos visto deducir tales extremos de argumentos de orden astronómico, pero obsérvese cuán secundaria es la función que desempeñan los mismos en los siguientes extractos aristotélicos:

El movimiento natural de la tierra, el de sus partes y el del conjunto, es hacia el centro del universo, de ahí su actual estado de reposo en el mismo. Puesto que ambos centros se confunden en un solo punto, cabría preguntarse hacia cuál de los dos son llevadas naturalmente las cosas que tienen peso y las partes de la tierra. ¿Alcanzan tal punto por ser el centro del universo o porque es el centro de la tierra? Los cuerpos se dirigen hacia el centro del universo […] pero sucede que el centro de la tierra y el del universo son un mismo punto. Así pues, los cuerpos con peso también se mueven en dirección al centro de la tierra, pero sólo accidentalmente y en razón de que la tierra tiene su centro en el centro mismo del universo […].

De tales consideraciones, se desprende de inmediato que la tierra está en reposo y situada en el centro. Además, la razón de su inmovilidad queda clara a partir de lo expuesto en la anterior discusión. Si es algo inherente a la naturaleza de la tierra, tal como se constata mediante la observación, moverse desde cualquier lugar en dirección hacia el centro, y si por otra parte el fuego se traslada desde el centro hacia los extremos, parte alguna de la tierra podrá ser alejada del centro sin someterla a una violencia […]. Así

pues, si es imposible alejar del centro ningún fragmento particular de tierra, aún lo será más hacerlo con su totalidad, puesto que es natural para el todo permanecer en el lugar hacia donde se dirigen naturalmente sus partes […].

En cuanto a su forma, la tierra es necesariamente esférica […]. Debemos representarnos mentalmente qué quiere decirse al afirmar que la tierra tuvo un origen […]. De un lado, es evidente que si las partículas que la constituyen proceden de todas partes dirigiéndose hacia un mismo punto, el centro, la masa resultante debe ser necesariamente regular, pues si se añade una misma cantidad por todo el entorno, la superficie del cuerpo exterior obtenido forzosamente equidistará del centro. Tal figura es la esfera. Por otro lado, nuestra argumentación no se vería afectada en lo más mínimo si las partes de la tierra no se precipitaran uniformemente sobre el centro. En efecto, entre dos masas la mayor siempre empujará y llevará por delante a la otra, siempre que la inclinación natural de ambas sea dirigirse hacia el centro, y la impulsión del cuerpo más pesado persistirá hasta que ambos alcancen el centro […].

Además, los sentidos nos ofrecen también otra prueba de tal comportamiento. Si la tierra no fuera esférica los eclipses de luna no presentarían las secciones que podemos observar […] y la observación de los astros nos muestra no sólo que la tierra es esférica, sino que su tamaño no es demasiado grande, pues un ligero cambio de posición por nuestra parte, sea hacia el norte o hacia el sur, altera visiblemente el círculo del horizonte y vemos un considerable cambio de posición en las estrellas situadas sobre nuestra cabeza, cambio dependiente de que nos desplacemos hacia el norte o hacia el sur. Ciertas estrellas visibles en Egipto y en las proximidades de Chipre, no lo son en las regiones más septentrionales. Por otra parte, las estrellas que se observan permanentemente en las regiones septentrionales se ponen en los países anteriormente indicados. Este hecho no sólo demuestra que la tierra es esférica sino que sus dimensiones no son demasiado grandes pues, de lo contrario, un pequeño cambio de posición sobre su superficie no tendría tan inmediatas consecuencias. Por tal razón, quienes suponen que las columnas de Hércules lindan con regiones de las

indias, de tal forma que existe un solo mar, no parece que alimenten ideas demasiado increíbles.[3.2]

Pasajes como el que acabamos de exponer demuestran la interdependencia entre la física terrestre y la astronomía. Las observaciones y teorías sobre las que se sustenta la una se mezclan íntimamente con las que conforman la otra. Por consiguiente, aunque las dificultades evidenciadas al intentar resolver el problema de los planetas hubieran podido proveer al astrónomo de una razón de peso para reelaborar los *dominios de la astronomía* en base a la idea de una tierra en movimiento, no era posible tal reestructuración sin alterar las bases universalmente aceptadas sobre las que descansaba el edificio de la física terrestre. Era prácticamente imposible que se le ocurriera abrazar la noción de una tierra en movimiento, pues sus conocimientos extra-astronómicos daban un carácter de inverosimilitud a tal idea. Parece ser que ésta es la línea de pensamiento seguida por Ptolomeo y sus sucesores cuando, en época posterior, presentaron como "ridículas", si bien satisfactorias desde el punto de vista astronómico, las hipótesis de Aristarco, Heráclides y los pitagóricos.

Examinemos, por ejemplo, el siguiente pasaje del *Almagesto*, en el que Ptolomeo rechaza la teoría heraclidiana de que la esfera de las estrellas se halla en estado estacionario y su aparente movimiento diurno en dirección oeste se debe a que la tierra central observa una rotación diurna y real hacia el este. Ptolomeo empieza por dar una serie de argumentos acerca de la esfericidad y de la posición central ocupada por la tierra muy similares a los expuestos por Aristóteles en el pasaje que acabamos de citar. Acto seguido dice:

Algunos pensadores, a pesar de que admiten no poder oponerse a tales argumentos, pretenden que nada impide suponer, por ejemplo, que la tierra gire alrededor de su eje de oriente a occidente completando una revolución aproximadamente cada día mientras los cielos permanecen en reposo […].

Cierto es que limitándonos a considerar los fenómenos del mundo estelar, quizá nada impida admitir tal teoría por razones de simplicidad […], pero si se juzga por lo que sucede a nuestro alrededor y en el aire, la opinión de tales gentes se nos muestra ridícula […]. [Si la tierra] efectuara su colosal revolución en tan corto espacio de tiempo […], los cuerpos que no estuvieran apoyados sobre su superficie parecerían tener el mismo movimiento pero en dirección contraria, con lo que ni las nubes, ni ningún animal volador o cuerpo arrojado al aire daría la sensación de dirigirse hacia el este, pues la tierra siempre les precedería en esta dirección y se anticiparía a ellos en su movimiento hacia oriente, de tal modo que todos parecerían retroceder hacia el oeste excepción hecha de la tierra.[3.3]

El *quid* de la argumentación ptolemaica es el mismo que el de la de Aristóteles, y fueron otros muchos los razonamientos derivados de idénticos principios a lo largo de la Edad Media y el Renacimiento. A menos que se vea empujado, un cuerpo siempre se dirige hacia su posición natural, y, una vez alcanzada, permanece en ella en absoluto reposo. Estas posiciones naturales y las trayectorias que siguen los cuerpos para alcanzarlas están completamente determinadas por la geometría intrínseca de un espacio absoluto, espacio en el que cada posición y cada dirección, ocupadas o no, han sido previamente rotuladas. Así pues, como afirma Aristóteles en otro de los pasajes de su tratado *Del cielo*, “Si se colocara la tierra en la posición actualmente ocupada por la luna, cada una de sus partes no se vería atraída hacia el conjunto, sino hacia el lugar [el centro] que ahora ocupa dicho conjunto”.[3.4] El movimiento natural de una piedra sólo está regido por el espacio y no por su relación con otros cuerpos. Por ejemplo, una piedra lanzada verticalmente hacia arriba se aleja del suelo y retorna a él a lo largo de una línea recta fijada de una vez por todas en el espacio, y si la tierra se mueve mientras la piedra está por los aires no caerá sobre el mismo punto del que partió. Asimismo, las nubes que ocupan ya los lugares naturales que les han sido asignados, serían dejadas atrás por una tierra en movimiento. La única posibilidad que cabría para que una piedra o una nube siguieran a la tierra en su movimiento sería que ésta arrastrara el aire que la circunda, y

aun en tal caso, el movimiento del aire no empujaría a la piedra con la fuerza necesaria para comunicarle la misma velocidad que posee la tierra en su rotación.

Desde luego, hay una serie de puntos débiles en esta teoría aristotélica del movimiento, algunos de los cuales desempeñaron posteriormente una función de primer orden dentro de la revolución copernicana. Sin embargo, tal como sucede con la cosmología de las dos esferas, la teoría del movimiento de Aristóteles es un excelente primer paso para comprender la naturaleza del mismo, y en el marco de dicho contexto era completamente necesaria la existencia de una tierra central e inmóvil. Así pues, los partidarios de una tierra planetaria iban a necesitar una nueva teoría del movimiento, y hasta que ésta no vio la luz en plena Edad Media, la física terrestre actuó como esquema conceptual inhibidor de la imaginación astronómica.

EL "PLENUM" ARISTOTÉLICO

Un segundo ejemplo de las restricciones que imponía a la imaginación del astrónomo la coherencia de las interrelaciones entre sus conocimientos en astronomía y los ajenos a tal disciplina nos lo proporciona la concepción aristotélica de un universo lleno o *plenum*. Este ejemplo es más típico que el anterior, pues los vínculos que conectan entre sí las diversas corrientes de conocimiento son aquí, a un mismo tiempo, más numerosos y menos entrecruzados que los que ilustraban el ejemplo de páginas precedentes. Comienza ahora a emerger ante nosotros el complejo cañamazo del pensamiento aristotélico.

Muy a menudo se hace referencia a la antigua concepción de la plenitud del universo como al *horror vacui*, el horror que siente la naturaleza ante el vacío. Como principio explicativo, podemos proponer la siguiente paráfrasis: la naturaleza intentará siempre impedir la formación de cualquier vacío. Bajo esta forma, los griegos lo hacían derivar de una serie de fenómenos naturales y se servían del mismo para explicarlos. El agua no

mana de una botella abierta que posea un gollete pequeño a menos que se practique en la misma un segundo agujero pues, sin un segundo agujero por el que pueda entrar el aire, el agua, al manar, dejaría un vacío tras de sí. Los sifones, los relojes de agua y las bombas de agua quedaban sumariamente explicados partiendo de tal principio físico. Algunos pensadores de la antigüedad se valieron del *horror vacui* para explicar el fenómeno de la adherencia y montar experimentos encaminados a diseñar motores de aire caliente y de vapor. Era imposible impugnar las bases experimentales del principio. Los griegos lo ignoraban todo acerca del utillaje necesario para efectuar sobre la tierra aproximaciones convincentes del vacío físico. No se dio fenómeno neumático alguno que permitiera desmentir el principio hasta que, con el desarrollo a amplia escala durante el siglo XVII de la industria minera, se descubrió que las bombas aspirantes no podían elevar el agua por encima de los 10 metros. Rechazar el *horror vacui* equivalía necesariamente a destruir una explicación científica perfectamente satisfactoria de un considerable número de fenómenos terrestres.

No obstante, tanto para Aristóteles como para sus sucesores, el *horror vacui* representaba algo más que un afortunado principio experimental aplicable a los puntos situados sobre la superficie terrestre o a los muy cercanos a la misma. Aristóteles sostenía, no sólo que *de hecho* no hay vacíos en el mundo terrestre, sino que, *en principio*, no puede haberlos en parte alguna del universo. Para Aristóteles, el propio concepto de vacío era contradictorio en sus términos, lo mismo que lo es la idea de “círculo cuadrado”. En la actualidad, cuando todo el mundo ha tenido la oportunidad de observar un “tubo de vacío” o ha oído hablar de una “bomba de vacío”, las pruebas lógicas de Aristóteles sobre la imposibilidad de que exista el vacío no convencen a casi nadie, si bien a menudo puede resultar difícil descubrir dónde se hallan los fallos de su razonamiento. No obstante, en ausencia de las contrapruebas experimentales de que disponemos en nuestros días, los argumentos de Aristóteles parecían sumamente convincentes, pues provenían de una auténtica dificultad inherente a las palabras que empleamos para discutir los problemas del espacio y la materia. A primera vista, el espacio sólo puede definirse como el volumen

ocupado por un cuerpo. En ausencia de cuerpo material nada hay que nos permita definir el espacio; aparentemente, el espacio no puede existir por sí mismo. Materia y espacio son inseparables como lo son las dos caras de una misma moneda. No puede existir espacio sin materia o, según los más alambicados términos de Aristóteles, "no existe nada parecido a una entidad dimensional fuera de la de las substancias materiales".[3.5]

La teoría de un universo lleno entró, pues, en el seno de la ciencia antigua gracias a la autoridad combinada de la lógica y de la experiencia, convirtiéndose desde un primer momento en uno de los ingredientes esenciales de las teorías cosmológicas y astronómicas. Por ejemplo, forma parte de la explicación aristotélica de la persistencia del movimiento de la esfera de las estrellas. Si uno cualquiera de los caparazones, celeste o terrestre, se viera reemplazado por el vacío, desaparecería todo movimiento en el interior de dicho caparazón. La causa de todo movimiento, excepto el retorno a la posición natural, está en el frotamiento entre caparazones, y el vacío en un lugar cualquiera del espacio rompería la cadena de impulsos motores. Nuevamente, tal como ya habíamos indicado, la imposibilidad de que exista un vacío constituye un argumento para sustentar la finitud del universo. No existe materia ni espacio, no existe nada más allá de la esfera de las estrellas. El aristotélico, sin un concepto que una indisolublemente materia y espacio, se vería obligado a admitir la infinitud del universo. La materia podría estar limitada por el vacío, y el vacío, a su vez, podría verse limitado por la materia, pero nada acotaría la continuidad de esta cadena, no existiría una última frontera en la que el universo acabara de una vez por todas.

Sin embargo, hay dos razones que difícilmente permitirían a un universo infinito seguir siendo aristotélico. Un espacio infinito no tiene centro; cada uno de sus puntos se halla a una misma distancia de todos los que constituyen su periferia. Si no existe centro, no hay ningún punto privilegiado donde pueda acumularse el elemento pesado, la tierra, y tampoco existen un "arriba" y un "abajo" *intrínsecos* que permitan determinar cuál es el movimiento natural que sigue un cuerpo para retornar a su posición propia. De hecho, en un universo infinito no existe "lugar

natural”, pues cualquiera de sus puntos es semejante por sus cualidades a los demás. Tal como veremos con mayor lujo de detalles en páginas posteriores, la teoría aristotélica del movimiento se halla indisolublemente vinculada a la idea de un espacio finito y completamente lleno, nociones ambas que se sostienen mutuamente y en las que es imposible rechazar una sin hacer lo propio con la otra.

Éstas no son las únicas dificultades que plantea a un aristotélico la infinitud del espacio. Si el espacio es infinito, y si en él no existe punto central privilegiado, es poco plausible que toda la tierra, el agua, el aire y el fuego del universo se haya acumulado en un sólo y único punto del mismo. En un universo infinito, es del todo natural suponer que existen otros mundos dispersados aquí y allá a lo largo y ancho de todo el espacio. Quizá haya también plantas, hombres y animales en todos estos otros mundos. De este modo desaparece la unicidad de la tierra y, con ella, la fuerza periférica que mueve a todo el conjunto; el hombre y la tierra ya no se encuentran en el centro del universo. Durante la antigüedad y la Edad Media, la mayor parte de los filósofos que, como los atomistas, creían que el universo era infinito se veían obligados a admitir tanto la existencia real del vacío como la pluralidad de los mundos. Hasta pleno siglo XVII no hay nadie que adoptando tales conceptos consiguiera elaborar una cosmología capaz de rivalizar con la de Aristóteles en la explicación de los fenómenos cotidianos, ya sean terrestres o celestes. Quizá hoy en día el de la infinitud del universo sea un concepto que cae de lleno bajo las pautas del sentido común, pero este sentido común, el nuestro, ha debido someterse a un proceso de reeducación.

La multifacética función desempeñada por la idea de un universo lleno en el pensamiento aristotélico es nuestro único ejemplo de gran categoría para dar cuenta de la coherencia de su cosmología o visión global del mundo. El *plenum* se halla estrechamente vinculado con la neumática, la persistencia del movimiento, la finitud del espacio, las leyes del movimiento, la unicidad de la tierra; y podríamos alargar la presente lista. Nótese que para ser justificado lógicamente el *plenum* no necesita ni de la unicidad, ni de la posición central, ni de la inmovilidad de la tierra;

simplemente se adapta a un esquema coherente en cuyo ámbito una tierra única, central e inmóvil es un segundo elemento esencial. Y viceversa; el movimiento de la tierra no exige la existencia del vacío ni la infinitud del universo. Sin embargo, no debe tomarse como simple casualidad que ambas nociones fueran admitidas y aceptadas poco después del triunfo de la teoría copernicana.

El propio Copérnico no creía ni en el vacío ni en la infinitud del universo. Veremos más adelante cómo se esforzó por mantener la mayor parte de los rasgos esenciales de la cosmología aristotélica y ptolemaica. No obstante, al atribuir a la tierra un movimiento axial, inmovilizaba la esfera de las estrellas y la privaba de su función física, mientras que al asignarle un movimiento orbital, hacía de todo punto necesario incrementar considerablemente las antiguas dimensiones de la esfera estelar. Así pues, la cosmología de Copérnico privaba a la materia interplanetaria de una buena parte de las funciones esenciales que desempeñaba en la teoría de Aristóteles y, simultáneamente, le exigía otras muchas de nuevas. Los sucesores de Copérnico no tardaron en hacer añicos la ya inútil esfera estelar, diseminando las estrellas por todo el espacio, admitiendo entre ellas la existencia de un vacío, o algo similar, y soñando en la existencia de otros mundos habitados por otros hombres en el seno de los vastos espacios situados más allá de nuestro sistema solar. Tampoco al principio terrestre del *horror vacui* le estaba reservada una larga vida. En el marco del nuevo universo, les era mucho más fácil a los científicos aceptar que desde hacía ya más de un siglo los mineros habían producido el vacío en el interior de sus bombas de agua; a partir del siglo XVII la presión atmosférica reemplazó al vacío en las concepciones de los fenómenos neumáticos. Otras muchas influencias desempeñaron un papel esencial en la modificación de los principios de la neumática —la historia es en extremo compleja—, pero la nueva astronomía de Copérnico fue un ingrediente necesario en este terreno. Una vez más, la teoría astronómica nos revela sus estrechas vinculaciones con las teorías de otras ciencias, del mismo modo que éstas nunca dejan de condicionar la imaginación de los astrónomos.

Las complicaciones extra-astronómicas no se limitan, empero, a actuar como agentes vinculantes entre la astronomía y otras ramas del conocimiento científico. Nuestras discusiones precedentes sobre los motivos que impulsaron las observaciones celestes lo han dejado entrever repetidamente; la tradición astronómica antigua debe su propia existencia, al menos en parte, a una percepción primitiva muy extendida del contraste que existe entre la potencia y la estabilidad de los cielos y la débil inseguridad de la vida terrestre. Esta misma percepción queda incorporada en la cosmología de Aristóteles a través de la distinción absoluta que hace entre las regiones sublunar y supralunar. No obstante, en la sumamente articulada versión de Aristóteles, tal distinción reposa de forma explícita en la posición central ocupada por la tierra y en la perfecta simetría de las esferas que engendran los movimientos estelares y planetarios.

Según Aristóteles, la superficie interior de la esfera de la luna divide el universo en dos regiones totalmente diferentes, ocupadas por distintas materias y no sometidas a las mismas leyes. La región terrestre, en la que vive el hombre, es la sede del cambio y de la variedad, del nacimiento y de la muerte, de la generación y la corrupción. La región celeste, por el contrario, es eterna e inmutable. De todos los elementos existentes, sólo el éter es puro e incorruptible. Sólo las esferas celestes, engranadas entre sí, se mueven natural y eternamente en círculos, con una velocidad siempre constante, girando sobre sí mismas por los siglos de los siglos y ocupando en todo momento la misma región del espacio. La substancia y el movimiento de las esferas celestes son los únicos compatibles con la inmutabilidad y la majestad de los cielos, siendo éstos quienes controlan y provocan toda diversidad y cambio producido sobre la tierra. En la descripción física que nos da Aristóteles del universo, lo mismo que en toda religión primitiva, el cielo circundante es la sede de la perfección y de la potencia, y de él depende toda vida terrestre. No hay equívoco alguno sobre éste punto en el tratado *Del cielo*:

De todo cuanto se ha dicho, se desprende claramente que […] el cuerpo primario [es decir, la materia celeste] es eterno; ni crece ni mengua, manteniéndose eternamente joven, inalterable e insensible. Parece como si la razón testimoniara en favor de la opinión común y que ésta lo haga en favor de la razón. En efecto, todo hombre tiene una cierta idea de los dioses, a los que siempre se les asigna el lugar más elevado; esta opinión la sustentan tanto bárbaros como helenos, de hecho todo aquel que cree en la existencia de los dioses, partiendo del obvio supuesto que lo inmortal está estrechamente vinculado con lo inmortal. Así pues, si existe un ser divino, y ciertamente existe uno, cuanto acabamos de afirmar sobre la primera de las substancias corporales [a saber, que es indestructible, inalterable, etc.] es completamente correcto.

Por otro lado, la evidencia sensible conduce a idéntica conclusión, y lo hace de forma suficientemente rigurosa si tenemos en cuenta que se trata de un aserto fundamentado sobre un testimonio humano. Si concedemos crédito a cuanto se ha transmitido de generación en generación, en ningún momento del tiempo pasado ha podido observarse cambio alguno en el cielo más exterior, ya sea en su totalidad, ya sea en cualquiera de las partes que le son propias.

El propio nombre parece haberse transmitido sin cambio desde la época de nuestros antepasados hasta llegar al presente […]. Suponiendo que el cuerpo primario es algo distinto de la tierra, del fuego, del aire y del agua, asignaron el nombre de *éter* a la región más elevada, denominación deducida de su incesante carrera durante toda la eternidad.[3.6]

El propio Aristóteles llevó algo más allá las ideas de majestuosidad y divinidad de las regiones celestes. La materia del cielo y sus movimientos son perfectos; todos los cambios terrestres están causados y gobernados por una serie de impulsos que tienen como origen los movimientos uniformes de las esferas celestes que circundan simétricamente la tierra. Nos encontramos ya ante un argumento significativo, de carácter extracientífico, en favor de la posición central de la tierra, que se verá reforzado después de la muerte de Aristóteles con la elaboración de la idea de un cielo perfecto y

con su integración en el marco de otros dos importantes conjuntos de creencias independientes entre sí. Pospondremos para el próximo capítulo el estudio de uno de tales desarrollos, la pormenorizada integración de la cosmología aristotélica en la teología cristiana, con lo que pasará a ocupar su lugar en el orden cronológico de los acontecimientos. Dicha integración condujo a un universo en el que cada detalle estructural adquiría una significación tanto física como religiosa; el infierno ocupaba su centro geométrico, el trono de Dios estaba situado más allá de la esfera estelar, cada esfera planetaria y cada epiciclo eran impulsados por un ángel. Por otra parte, el concepto de la majestad de los cielos sustenta la ciencia astrológica, mucho más antigua que la cosmología cristiana, e incluso que la aristotélica, y con un impacto sobre los cultivadores de la astronomía más inmediato que el ejercido por la teología. Puesto que les afectaba desde un punto de vista profesional, parece sumamente plausible que la astrología haya sido la más importante de las fuerzas que han inclinado a los astrónomos a defender la unicidad de la tierra.

Ya hemos señalado las principales fuentes de la creencia astrológica y su relación con la concepción aristotélica del poder de los cielos. Distancia e inmutabilidad hacen de los cielos un lugar muy adecuado donde ubicar a los dioses para poder intervenir a su antojo en los asuntos humanos. Las rupturas de la regularidad celeste —en particular la aparición de cometas y los eclipses— habían sido consideradas desde tiempos remotos como augurios que anunciaban sucesos excepcionalmente felices o desastrosos. Por otra parte, la observación da buenos testimonios de una influencia celeste sobre, al menos, algunos acontecimientos terrestres. Hace calor cuando el sol está en la constelación de Cáncer y frío cuando está en la de Capricornio. La variación de altura de las mareas está en función de la variación de las fases de la luna; el ciclo menstrual de la mujer se repite a intervalos de tiempo regulares equivalentes al mes lunar. En una época en la que la necesidad de comprender y controlar su destino estaba infinitamente por encima de sus disponibilidades físicas e intelectuales, el hombre extendía con toda naturalidad a los planetas y demás cuerpos celestes esta supuesta prueba del poder de los cielos. En particular, desde el momento en

que Aristóteles introdujo un mecanismo físico —la transmisión por frotamiento— por medio del cual los cuerpos celestes podían provocar cambios sobre la tierra, se le ofreció al estudioso una base plausible sobre la que fundamentar su creencia en que la posibilidad de prever las configuraciones celestes permitiría a los hombres vaticinar su futuro y el de las naciones.

Los documentos anteriores al siglo II antes de nuestra era dan escasos indicios de tentativas serias encaminadas a predecir con detalle los futuros acontecimientos terrestres a partir de las posiciones observadas y calculadas de las estrellas y de los planetas. Sin embargo, poco después de este arranque relativamente tardío, la astrología iba a verse indisolublemente vinculada a la astronomía a lo largo de más de 1800 años, constituyendo conjuntamente una sola actividad profesional. La astrología que vaticinaba el porvenir de los hombres a partir de las estrellas recibía el nombre de astrología judicial; la astronomía que vaticinaba el porvenir de las estrellas partiendo de su presente y de su pasado era designada bajo el nombre de astrología natural. En general, quien había adquirido reputación en alguna de ambas ramas, acostumbraba a ser muy bien conocido entre los cultivadores de la otra. Ptolomeo, cuyo *Almagesto* presenta la astronomía antigua en su forma más elaborada, era igualmente famoso por su *Tetrabiblos*, contribución clásica de la antigüedad al campo de la astrología judicial. Astrónomos europeos de finales del renacimiento, como Brahe y Kepler, que aceptaron el sistema de Copérnico bajo un ángulo muy similar al modernamente admitido, se beneficiaron a lo largo de sus vidas de un amplio apoyo intelectual y financiero porque se creía que eran quienes elaboraban los mejores horóscopos.

Durante la mayor parte del período del que nos ocupamos en el resto del libro, la astrología ejerció una enorme influencia sobre los más cultivados espíritus de Europa. A principios de la Edad Media (fue parcialmente suprimida por la Iglesia, cuya doctrina, al subrayar la libertad de que goza el hombre para escoger el bien del cristianismo, era absolutamente incompatible con el estricto determinismo astrológico. No obstante, durante un período centrado en el nacimiento de Cristo y que abarca unos cinco

siglos, lo mismo que a finales de la Edad Media y a lo largo de todo el Renacimiento, la astrología fue la guía de reyes y pueblos, y no es por mero accidente que precisamente en tales épocas hiciera sus más rápidos y espectaculares progresos, la astronomía que situaba a la tierra en el centro del universo. Las elaboradas tablas de posición de los diferentes planetas y las complejas técnicas de cálculo elaboradas por los astrónomos planetarios desde la antigüedad hasta el Renacimiento fueron los prerrequisitos principales para llevar a cabo predicciones astrológicas. Hasta después de la muerte de Copérnico, estos productos de primer orden dentro de la investigación astronómica no tuvieron prácticamente ninguna otra aplicación significativa. Así pues, la astrología proporcionaba la razón fundamental para dedicar esfuerzos al estudio del problema de los planetas, con lo que se convirtió en un elemento de particular importancia para el desarrollo de la imaginación astronómica.

Sin embargo, la astrología y la percepción del poder celestial que aquella implica pierden gran parte de su plausibilidad si la tierra es un planeta. Una tierra planetaria puede ejercer sobre Saturno una influencia tan poderosa como la que Saturno pueda ejercer sobre ella; aplicando idéntica argumentación a todos y cada uno de los planetas restantes, se hunde por su base la dicotomía terrestre-celeste. Si la tierra es un cuerpo celeste, debe compartir la inmutabilidad que caracteriza a los cielos y éstos, a su vez, deben participar de la corruptibilidad de la tierra. No es, pues, en modo alguno una coincidencia que el completo dominio ejercido por la astrología sobre el espíritu humano se relajara precisamente en el mismo momento en que comenzaba a imponerse la teoría copernicana. Incluso puede ser significativo que Copérnico, autor de la teoría que finalmente despojaba al cielo de todo poder especial, perteneciera al minoritario grupo de astrónomos renacentistas que no hicieron horóscopos.

La astrología y la majestad de los cielos nos dan, pues, un ejemplo más de las consecuencias indirectas de la estabilidad y unicidad de la tierra, consecuencias a menudo ejemplarizadas, aunque nunca estudiadas de modo exhaustivo, dentro de esta larga discusión sobre las múltiples funciones que desempeña una tierra central y estable en el marco de la concepción

aristotélica del universo. Evidentemente, son consecuencias como las apuntadas, y otras semejantes, las que hacen de la revolución copernicana una auténtica revolución. Describir la innovación introducida por Copérnico como un simple intercambio de las posiciones ocupadas por la tierra y el sol equivale a convertir en una topinera un elevado promontorio dentro de la historia del pensamiento humano. Si las propuestas de Copérnico no hubieran tenido repercusión alguna sobre sectores ajenos a la astronomía, su aceptación generalizada no se habría visto diferida durante tan largo tiempo ni habría encontrado tan encarnizada resistencia.

LA CONCEPCIÓN ARISTOTÉLICA DEL MUNDO VISTA EN PERSPECTIVA

La concepción aristotélica del mundo fue la principal fuente y el punto de apoyo básico para la astronomía práctica precopernicana. Pero la época de Aristóteles no es la nuestra, por lo que se hace necesaria una auténtica transposición mental para abordar los escritos del gran filósofo, en particular los que tratan de física y cosmología. Sin tal cambio de perspectiva, a lo único que puede aspirarse es a dar explicaciones deformadas y capciosas de las razones que abogan en favor de la pervivencia de la física aristotélica a lo largo de la antigüedad y de la Edad Media.

Por ejemplo, se ha dicho muy a menudo que fue la preferencia que sentían los científicos medievales por la autoridad de la palabra escrita, en especial la de los textos antiguos, frente a lo que pudieran indicarles sus propios ojos la que puede haberles inclinado a seguir aceptando la absurda afirmación de Aristóteles según la cual los cuerpos pesados caen más aprisa que los ligeros. Según tal interpretación, la ciencia moderna nació en el momento en que Galileo rechazó los textos en provecho de la experiencia y observó que dos cuerpos de distinto peso llegan al suelo en el mismo instante cuando se los deja caer desde lo alto de la torre de Pisa. Todo colegial sabe hoy en día que los cuerpos pesados y los ligeros caen con

idéntica velocidad. Sin embargo, el colegial se equivoca y la historia no es exactamente como acabamos de contarla. En el mundo cotidiano, tal como lo examinaba Aristóteles, los cuerpos pesados caen más rápido que los cuerpos ligeros. He aquí un hecho primario percibido sensorialmente. La ley de Galileo es más útil a la ciencia que la de Aristóteles, no porque traduzca la realidad con mayor perfección, sino porque, más allá de la regularidad superficial percibida por los sentidos, descubre un aspecto esencial del movimiento oculto a los mismos. Para verificar experimentalmente la ley de Galileo es necesario disponer de un instrumental especializado; los sentidos, por sí mismos, no pueden confirmárnosla. El propio Galileo no extrajo su ley de la observación; en todo caso, no lo hizo de una observación nueva, sino que la dedujo a través de una serie de razonamientos lógicos como los que examinaremos en el capítulo siguiente. Es muy probable que jamás llegara a efectuar el experimento de la torre de Pisa; uno de sus detractores lo llevó a cabo y el resultado fue favorable a las tesis de Aristóteles, es decir, el cuerpo pesado fue el primero en llegar al suelo.

La historia popular de la refutación de Aristóteles por parte de Galileo es en gran parte un mito motivado por una falta de perspectiva histórica. Olvidamos con demasiada facilidad que un buen número de los conceptos en que creemos nos fueron penosamente inculcados en nuestra infancia. Tomamos tales conceptos como productos naturales exclusivamente vinculados con nuestros sentidos, y sobre los que no cabe la más mínima duda, y desechamos como errores enraizados en la ignorancia, la estupidez o la ciega obediencia a la autoridad cualquier idea que difiera de los mismos. Nuestra propia educación levanta un muro entre nosotros y la física aristotélica llevándonos a menudo a interpretar erróneamente la naturaleza y las bases de la inmensa influencia que ejerció Aristóteles sobre las generaciones que le sucedieron.

Parte de la autoridad de los escritos aristotélicos deriva del brillo y la originalidad de sus ideas y parte procede de su inmensa extensión y coherencia lógica, factores que siguen impresionándonos hoy como siempre. Sin embargo, según mi opinión, el núcleo primario de la autoridad

ejercida por Aristóteles reside en un tercer aspecto de su pensamiento, mucho más difícil de captar que los anteriores para el espíritu moderno. Aristóteles sabía expresar de forma abstracta y congruente muchas de las percepciones inmediatas del universo sensible, observadas desde varios siglos antes de que él les diera una formulación verbal lógica y racional; en un buen número de casos son estas percepciones las que la educación científica elemental ha ido suprimiendo del espíritu del adulto occidental desde el siglo XVIII hasta llegar a nuestros días. El concepto de la naturaleza que tienen en la actualidad la mayor parte de los adultos muestra escasos puntos de contacto importantes con el de Aristóteles; sin embargo, es sorprendente la frecuencia con que las ideas de los niños, de los miembros de tribus primitivas y de muchos enfermos mentales regresivos son comparables con las del gran sabio griego. Algunas veces tales paralelismos son difíciles de descubrir, pues se esconden bajo el vocabulario abstracto y elaborado de Aristóteles lo mismo que bajo su método lógico de pensamiento. Los elementos de la dialéctica aristotélica son totalmente ajenos a las mentes de los niños y de los hombres primitivos, pero el marco conceptual sobre el que trabajan permanece. Las ideas esenciales de Aristóteles sobre la naturaleza, en contraste con la forma que tiene de exponerlas y documentarlas, revelan importantes residuos de conceptos más antiguos y elementales sobre el universo. En consecuencia, a menos que prestemos una gran atención a tales vestigios, el sentido y la fuerza de importantes fragmentos de la doctrina aristotélica puede escapársenos totalmente.

La naturaleza de estos vestigios primitivos y la forma en que se ven transformados por la dialéctica aristotélica quedan ilustrados con toda claridad en las discusiones de Aristóteles sobre el espacio y el movimiento. Las ideas de los niños y de las sociedades primitivas sobre el mundo tienden a ser animistas; es decir, los niños, lo mismo que muchos pueblos primitivos, no distinguen neta y rápidamente, como nosotros, entre naturaleza orgánica y naturaleza inorgánica, entre mundo vivo y mundo inanimado. El universo orgánico goza de una prioridad conceptual, y se tiende a explicar el comportamiento de las nubes, del fuego o de las piedras

en términos de los impulsos internos y los deseos que agitan a los hombres y, probablemente, a los animales. Un niño de cuatro años al que se le pregunta por qué suben hacia el cielo los globos, responde: “Porque quieren volar”. Otro, de seis, dice que los globos suben porque “les gusta el aire, y cuando se les suelta, suben al cielo”. Hans, cinco años, cuando se le pregunta por qué cae al suelo una caja, responde: “Porque quiere” —¿por qué?— “Porque es bueno [para la caja estar en el suelo]”.[3.7] Los hombres primitivos dan con frecuencia explicaciones similares, aunque algunas de ellas sean más difíciles de descifrar al hallarse integradas en mitos que no pueden ser interpretados literalmente. Ya hemos visto en páginas anteriores que los egipcios explicaban el movimiento del sol como el de un dios que surca los cielos en su embarcación.

Las piedras de Aristóteles no están vivas, aunque, al menos metafóricamente, sí parezca estarlo su universo. (Hay pasajes en la obra de Aristóteles que traen a la memoria el fragmento del *Timeo* de Platón citado en el primer capítulo.) Con todo, su idea sobre la piedra que escapa de la mano para retornar a su lugar natural en el centro del universo no es tan diferente de la que tiene el niño cuando afirma que al globo le gusta el aire o que la caja cae porque es bueno para ella estar en el suelo. El vocabulario ha cambiado, los conceptos son manejados con una lógica adulta, el animismo ha sufrido una mutación, pero gran parte del atractivo de la doctrina aristotélica debe residir en la naturalidad de la percepción que la sustenta.

No obstante, el animismo no nos da cuenta de todo el sustrato psicológico, de la explicación dada por Aristóteles al movimiento. Un elemento más sutil, y, según creo, más importante proviene de la transmutación aristotélica de la percepción primitiva del espacio. El primitivo concepto de espacio es muy diferente de nuestra idea newtoniana del mismo, en la que hemos sido educados sin percatarnos de ello. El espacio newtoniano es físicamente neutro, Un cuerpo debe estar localizado *en* el espacio y moverse *a través* del espacio, pero el lugar concreto que ocupa y la dirección particular de su movimiento no ejercen la más mínima influencia sobre dicho cuerpo. El espacio es un sustrato inerte para todos los

cuerpos. Todo punto del espacio es semejante a cualquier otro; toda dirección es similar a otra. En terminología moderna, el espacio es homogéneo e isótropo; no hay "arriba" ni "abajo", no hay "este" ni "oeste".

Por el contrario, el espacio primitivo está más cerca de lo que podríamos denominar un espacio vital: el espacio de una habitación, de una casa o de una comunidad. Existe un "arriba" y un "abajo", un "este" y un "oeste" (o una "cara" y una "espalda", pues en muchas sociedades primitivas las palabras que sirven para indicar direcciones provienen de términos que designan partes del cuerpo, de las que reflejan sus diferencias intrínsecas). Cada posición es una posición "para" un objeto o un lugar "donde" se produce una actividad característica. Cada región y cada dirección del espacio difieren de forma característica de las restantes, y las diferencias entre ellas determinan parcialmente el comportamiento de los cuerpos situados en las mismas. El espacio de los primitivos es el espacio dinámico activo de la vida cotidiana, donde lugares diferentes tienen características distintas.

La cosmología de los egipcios nos da un ejemplo de cuanto venimos diciendo: la región de las estrellas circumpolares se convierte en la región de la vida eterna, la región de aquellos que nunca mueren. Una percepción similar del espacio constituye una de las bases sobre las que se sustenta el pensamiento astrológico. La naturaleza y el poder de los planetas dependen de la posición que ocupan en el espacio. Un viejo texto babilónico afirma: "Cuando la estrella Marduk [el planeta Júpiter] se encuentra en el ascendente [es decir, está situada en puntos bastante bajos respecto al horizonte oriental], es Nebo [el dios Mercurio]. Cuando se ha elevado […] [número omitido] dobles horas, es Marduk [el dios Júpiter]. Cuando se encuentra en medio de los cielos, es Nibiru [el más alto, el dios todopoderoso]. Cada planeta se convierte en esto al llegar a su cénit".[3.8]

Los vestigios primitivos inherentes a la concepción aristotélica del espacio rara vez están claros. Pero examinemos la siguiente discusión sobre el movimiento extraída de la *Física* de Aristóteles:

Las trayectorias típicas de los cuerpos naturales simples, fuego, tierra y otros semejantes, indican, no sólo que el lugar es algo, sino también que ejerce una cierta influencia. En efecto, si no se interpone ningún tipo de obstáculo, todos y cada uno de ellos son transportados hacia su propia ubicación, uno hacia arriba, otro hacia abajo […] "arriba" no es cualquier lugar, sino allí hacia donde son llevados el fuego y la luz, lo mismo que no lo es abajo el lugar hacia donde se ven trasladadas las cosas terrosas y con peso; de ello se infiere que tales lugares no sólo difieren por su posición relativa, sino también porque gozan de distintas potencias.[3.9]

Este pasaje es un resumen casi perfecto de la concepción del espacio que subyace en la explicación aristotélica del movimiento: "el lugar […] ejerce una cierta influencia" y "tales lugares no sólo difieren por su posición relativa, sino también porque gozan de distintas potencias". Dichos lugares se hallan en un espacio que desempeña un papel activo y dinámico en el movimiento de los cuerpos; es el propio espacio quien proporciona el impulso que conduce al fuego y a las piedras a sus respectivos lugares naturales de reposo situados en la periferia y el centro del universo. Las interacciones materia-espacio determinan el movimiento y el reposo de los cuerpos. Esta última noción no nos es familiar porque somos herederos de la revolución copernicana, que ha obligado a descartar y reemplazar el concepto aristotélico de espacio. No obstante, no se trata de una idea inverosímil. Quizá sea pura coincidencia, pero lo cierto es que el concepto de espacio dentro de la teoría de la relatividad generalizada de Einstein tiene, en muchos aspectos importantes, mayor similitud con el aristotélico que con el newtoniano. El universo de Einstein, lo mismo que el de Aristóteles y a diferencia del de Newton, puede ser finito.

La concepción aristotélica del universo no fue la única creada en la antigüedad, ni tampoco la única que tuvo partidarios. Sin embargo, estaba mucho más cerca de las primitivas cosmologías que las de sus rivales, y se ajustaba con mucha más precisión que las restantes a los testimonios ofrecidos por la percepción sensorial. Ésta es otra de las razones que explican su considerable influencia, particularmente a finales de la Edad

Media. Una vez aislada al menos parte de su atractivo, nos será más fácil apreciar la fuerza con que la cosmología aristotélica contribuyó a la tradición astronómica de la antigüedad. Queda ahora por descubrir qué aspectos, dentro de dicha tradición, preparaban el camino a Copérnico.

Capítulo 4

LA TRADICIÓN REMODELADA: DE ARISTÓTELES A LOS COPERNICANOS

La ciencia y el saber en Europa hasta el siglo XIII

Aristóteles fue el último gran cosmólogo de la antigüedad y Ptolomeo, quien vivió casi cinco siglos más tarde, el último gran astrónomo. La obra de ambos dominó el pensamiento occidental en los campos de la astronomía y la cosmología hasta después de la muerte de Copérnico, acaecida en 1543. Copérnico parece ser su heredero directo, pues en el curso de los trece siglos que separan la muerte de Ptolomeo y el nacimiento de Copérnico no se produce ningún cambio importante y duradero en la obra de los grandes sabios de la antigüedad. De hecho, Copérnico arranca donde Ptolomeo se había parado, motivo que induce a muchos a concluir que la ciencia fue algo inexistente durante los siglos que separan las vidas de ambos astrónomos. Sin embargo, la actividad científica, aunque intermitente, fue muy intensa durante esta época y desempeñó un papel esencial en la preparación del terreno para el nacimiento y posterior triunfo de la revolución copernicana.

La paradoja que parece adivinarse de tal estado de cosas es solamente aparente. Trece siglos de investigaciones intermitentes no modificaron los rasgos esenciales de las creencias de los investigadores. Los maestros de Copérnico aún creían que la estructura del universo era tal como la describían Aristóteles y Ptolomeo, con lo que quedaban plenamente

enmarcados en el seno de la tradición antigua. No obstante, su actitud frente a dichas creencias no era la misma que en épocas pretéritas. Los esquemas conceptuales envejecen a medida que se suceden las generaciones que los toman como marco de referencia. A principios del siglo XVI se seguía creyendo en la antigua descripción del universo, pero ya no se le atribuía el mismo valor. Los conceptos eran los mismos, pero se descubrían en ellos defectos y virtudes enteramente nuevos. De modo similar a como hemos explorado los orígenes y la fuerza de la tradición astronómica antigua, debemos descubrir en qué vino a parar con el transcurso del tiempo. Empezaremos por ocuparnos de cómo desapareció dicha tradición para enfrentarnos acto seguido con el estudio de su redescubrimiento, pues los primeros cambios de actitud de los europeos frente a la misma tienen su origen en la necesidad de recuperarla.

El mundo occidental perdió su herencia científica en dos etapas. La primera de ellas corresponde a un lento declive, cualitativo y cuantitativo, de la actividad científica, mientras que la segunda fue una auténtica desaparición del saber tradicional. A partir del siglo II antes de nuestra era, la civilización mediterránea fue cayendo paulatinamente bajo la égida de Roma, y su declive corre paralelo a la pérdida de la hegemonía romana durante los primeros siglos de la era cristiana. Ptolomeo, en astronomía, y Galeno, en medicina, fueron las últimas grandes figuras de la ciencia antigua, transcurriendo la vida de ambos sabios dentro del siglo II de nuestra era. A partir de este momento, los trabajos científicos de mayor peso específico que se producen en occidente son comentarios y enciclopedias. Cuando en el siglo VII los árabes invadieron la cuenca mediterránea, sólo encontraron los documentos y la tradición del saber antiguo. La actividad científica como tal había desaparecido casi por completo. Europa había entrado en las tinieblas del medievo.

Las invasiones islámicas desplazaron hacia el norte el centro de la cristiandad europea, expulsada casi por completo de las riberas mediterráneas, con lo que se acentuó el continuado declive del saber occidental. Durante el siglo VII, los europeos se vieron incluso privados del

fondo documental que recogía la tradición antigua y permitía su transmisión. Euclides sólo era conocido a través de las incompletas traducciones al latín efectuadas por Boecio, trabajos que datan de principios del siglo VI; en dichas versiones tan sólo se daba parte de los teoremas más importantes y no se incluía demostración alguna de los mismos. Ptolomeo parecía ser completamente desconocido, mientras que Aristóteles sólo estaba representado por unos pocos tratados sobre lógica. Colecciones enciclopédicas reunidas por hombres como Boecio o Isidoro de Sevilla preservaron ciertos fragmentos de la ciencia antigua, pero se trataba de compilaciones a menudo imprecisas, intelectualmente adulteradas y, en gran medida, impregnadas por la leyenda. La actividad era escasa en todos los dominios del saber. El nivel económico de la cristiandad europea apenas alcanzaba para su subsistencia. La ciencia era menospreciada de forma particular porque, tal como veremos en el próximo capítulo, en un principio la Iglesia católica se le mostró hostil.

Durante los siglos en los que el saber alcanzaba en Europa su nadir, el Islam conoció un gran renacimiento científico. A partir del siglo VII, el mundo musulmán se extendió con rapidez inusitada, pasando de un oasis árabe a un imperio mediterráneo; este nuevo imperio fue quien heredó los manuscritos y la tradición científicos perdidos por la cristiandad. Los científicos árabes comenzaron la reconstrucción de la ciencia antigua traduciendo al árabe las versiones siríacas de los textos griegos, para aportar en épocas posteriores sus propias contribuciones. Las matemáticas, la química y la óptica progresaron de forma fundamental gracias a sus trabajos originales. En astronomía, aportaron a un mismo tiempo nuevas observaciones y nuevas técnicas para calcular las posiciones de los planetas. Sin embargo, fueron escasas las ocasiones en que los árabes se mostraron radicalmente innovadores en el dominio de la teoría científica. En particular, su astronomía se desarrolló casi de forma exclusiva en el marco de la tradición técnica y cosmológica de la antigüedad clásica. Así pues, desde el restringido enfoque que interesa a nuestro estudio en este momento, la civilización islámica es importante ante todo porque conservó y reprodujo abundantemente los documentos de la ciencia griega que más

tarde utilizarían los sabios europeos. La cristiandad redescubrió el saber antiguo, por encima de todo gracias a los árabes y generalmente en traducciones árabes. El título de *Almagesto* bajo el que conocemos la obra más importante de Ptolomeo no es en modo alguno un término griego, sino una contracción del título árabe que le dio un traductor musulmán del siglo IX de nuestra era.

Los europeos redescubrieron el saber antiguo recuperado por el Islam durante el período de reconquista generalizada que tanto iba a modificar el talante de la Europa de finales de la Edad Media con respecto al que poseía durante los primeros siglos de la misma. Iniciado lentamente a partir del siglo X para alcanzar su punto culminante en lo que ahora conocemos como el Renacimiento del siglo XII, el ritmo de la vida europea tuvo un incremento progresivo desde todos los puntos de vista. La cristiandad alcanzaba una relativa estabilidad política por primera vez; paralelamente, crecía la población y se desarrollaban los intercambios comerciales, incluyendo entre éstos las relaciones de Europa con el mundo musulmán. Los contactos intelectuales con el Islam crecieron con los comerciales. Las riquezas y la seguridad recientemente adquiridas dejan tiempo libre para explorar los horizontes de nuevo abiertos al saber. Las primeras traducciones latinas de textos en árabe datan del siglo X y se multiplicarán con rapidez inusitada en los siglos inmediatamente posteriores. A finales del siglo XI, estudiantes procedentes de toda Europa comienzan a reunirse oficiosamente, pero en número siempre creciente, para asistir a la lectura y el comentario de una nueva traducción de un texto antiguo. Durante los siglos XII y XIII, estas reuniones, inicialmente informales, adquirieron tal importancia que se hizo necesario el establecimiento de reglas y estatutos o cartas constitucionales que las transformaran oficialmente en universidades, nuevo tipo de instituciones eruditas propias de Europa. Centros donde transmitir oralmente el saber antiguo en su origen, estas universidades se convirtieron en corto plazo en el albergue de una tradición original y creadora de la erudición europea, la crítica y combativa tradición filosófica conocida bajo el nombre de escolástica.

El redescubrimiento de la antigua astronomía formó parte de la amplia reforma de la ciencia y de la filosofía del mundo antiguo. Las primeras tablas astronómicas empleadas por los europeos fueron importadas de Toledo en el siglo XI. El *Almagesto* de Ptolomeo y la mayor parte de las obras de Aristóteles sobre astronomía y física fueron traducidas al latín durante el siglo XII, mientras que a lo largo del siglo siguiente entraron a formar parte integrante, aunque de un modo selectivo, del programa de las universidades medievales. Copérnico siguió estudios universitarios a finales del siglo XV, y es el comentado retorno a los clásicos de la ciencia antigua quien le convierte en heredero directo de Ptolomeo y Aristóteles. Sin embargo, éstos difícilmente hubieran reconocido como suya la obra que recibió en herencia Copérnico. Viejos problemas, aún sin resolver, habían desaparecido por completo y su lugar lo ocupaban otros radicalmente nuevos, aunque en muchos casos no fueran más que pseudoproblemas. Por otro lado, los objetivos y los métodos de la rejuvenecida tradición científica diferían significativamente de los que habían guiado a los estudiosos de la antigüedad.

Algunos de los nuevos problemas tenían un origen puramente textual. Los antiguos escritos fueron recuperados fragmento a fragmento según un orden que se ajustaba más a las leyes del azar que a las de la lógica. Los manuscritos árabes raramente guardaban fidelidad total a sus fuentes griegas o siríacas. El latín medieval al que habían sido traducidos no disponía en sus comienzos de un vocabulario adecuado a tan abstractas y técnicas materias; algunas excelentes traducciones se veían inevitablemente deterioradas por las sucesivas transcripciones efectuadas por hombres que no comprendían total y perfectamente el contenido del texto traducido. A menudo era difícil, e incluso imposible en algunos casos, saber qué respuesta habían dado Aristóteles o Ptolomeo a un problema en particular. No obstante, los eruditos medievales preferían esforzarse en reconstruir el pensamiento antiguo que correr el riesgo de emitir un juicio propio. El esplendor, el alcance y la coherencia del inesperado legado cultural no podían por menos que deslumbrar a aquellos hombres que acababan de salir de tan oscuros siglos; naturalmente, creyeron que su primer deber era

asimilar tal herencia. Los problemas de interpretación y de reunificación se amontonaron en espera de ser discutidos en el marco del pensamiento escolástico.

Por otro lado, la tarea del erudito medieval se veía adicional y artificialmente complicada por la falta de perspectiva histórica. El científico soñaba con volver a establecer un sistema de conocimiento vasto y coherente como el modelado por Aristóteles y no siempre admitía que la "antigüedad" de la que derivaba dicho sistema había conocido opiniones divergentes sobre muchas de las cuestiones de detalle. Aunque difícilmente reconocido por los escolásticos (atribuyendo el hecho a errores de transmisión o a defectos de traducción), lo cierto es que el propio Aristóteles no siempre había sido congruente en sus razonamientos. Por otro lado, sus contemporáneos no habían aceptado de forma incondicional todas sus ideas. Desde sus primeros comienzos, la ciencia antigua había conocido equívocos y contradicciones ocasionales en su proceso de elaboración. Esta serie de equívocos y contradicciones se vieron considerablemente ampliados gracias a los textos de los comentaristas griegos y musulmanes, que, escritos durante los quince siglos que separan a Aristóteles de sus discípulos europeos, fueron recuperados al mismo tiempo, y algunas veces incluso antes, que los del maestro. Las contradicciones de la tradición nos parecen hoy en día consecuencias naturales de su evolución y proceso de transmisión, pero el erudito medieval las veía muy a menudo como contradicciones internas dentro de un único *corpus* de conocimiento, esa hipotética entidad denominada "sabiduría antigua". La comparación entre autoridades en conflicto y su reconciliación se convirtieron, en parte a causa de la confusión apuntada, en rasgos característicos del pensamiento escolástico. Tal como veremos de forma más detallada en este mismo capítulo, la nueva tradición científica fue menos empírica, más oral, más lógica y más racional de lo que lo fue su antecesora.

Una de las contradicciones de la tradición antigua ha desempeñado un papel particularmente significativo en el desarrollo de la astronomía: el aparente conflicto entre las esferas de la cosmología aristotélica y los

epiciclos y los deferentes de la astronomía ptolemaica. Aunque no lo hayamos indicado de forma explícita en páginas anteriores, estas dos astronomías eran en verdad productos característicos de dos diferentes civilizaciones antiguas, la helénica y la helenística. La civilización helénica nació en la Grecia continental durante la época en que ésta dominaba la cuenca mediterránea. La ciencia que alumbró era esencialmente cualitativa por el método y cosmológica por su orientación. Aristóteles fue el más grande, y el último de sus representantes. Poco antes de su muerte, la evolución de la ciencia helénica se vio prematuramente interrumpida al caer Grecia bajo el poder de Alejandro Magno, quien la anexionó a un gran imperio que abarcaba la totalidad del Asia Menor, Egipto y Persia hasta orillas del Indo. La civilización helenística, surgida después de las conquistas guerreras de Alejandro Magno, se centró en metrópolis comerciales y cosmopolitas como Alejandría, donde la confluencia de sabios de diferentes países y razas y la confrontación de sus diversas culturas dio como producto una ciencia menos filosófica, más matemática y más numérica que su predecesora la ciencia helénica. El contraste que acabamos de apuntar nos lo ilustra con toda perfección la astronomía. El marco de referencia cosmológico de la antigua astronomía es en su mayor parte producto de la tradición helénica, de la que la obra de Aristóteles constituye el punto culminante. La astronomía matemática de Hiparco y Ptolomeo pertenece a la tradición helenística que, en dicho campo, no floreció hasta unos dos siglos después de la muerte de Aristóteles.

Los astrónomos helenísticos, dedicados a medir el universo, catalogar estrellas y resolver el problema de los planetas, no se mostraban en modo alguno indiferentes ante la cosmología desarrollada por sus predecesores helénicos. Ridiculizaban a los autores de cosmologías que se apartasen de las normas establecidas y, ocasionalmente, ellos mismos se entregaban a la tarea de redactar algún tratado cosmológico. El propio Ptolomeo es autor de una obra completamente cosmológica, las *Hipótesis sobre los planetas*, donde se expone un mecanismo físico escasamente satisfactorio en explicar los movimientos epicíclicos. Sin embargo, cuando diseñaban sistemas matemáticos para predecir las posiciones de los planetas, los astrónomos

helenísticos no se preocuparon casi nunca por la posibilidad de construir contrapartidas mecánicas para sus edificios geométricos. La realidad física de los caparazones esféricos y los mecanismos que aseguraban el movimiento de los planetas eran para los astrónomos helenísticos, como máximo, problemas secundarios. En pocas palabras, los científicos helenísticos aceptaban sin ningún malestar aparente una tácita y parcial separación entre la astronomía y la cosmología. Según su punto de vista, un método matemático satisfactorio para prever la posición de los planetas no tenía porqué hallarse en completo acuerdo con las exigencias psicológicas de verosimilitud cosmológica.

En el siglo XVI, dicha bifurcación ofrecía un precedente importante a Copérnico. Puesto que él también veía la astronomía como algo esencialmente matemático, la incongruencia, desde el punto de vista físico, de un epiciclo dotado de movimiento en un universo de esferas podía ser un tímido antecedente de la incongruencia física que representa una tierra en movimiento. Pero no fue ésta la primera ni la única influencia ejercida por la bifurcación entre astronomía y cosmología que establecieron los sabios helenísticos. Cuatro siglos antes del nacimiento de Copérnico, cuando Aristóteles y Ptolomeo acababan de ser redescubiertos por los europeos, ya había contribuido a preparar el terreno al cambio revolucionario, aunque por senderos muy diferentes. Los escolásticos, cuya ignorancia sobre los siglos precedentes había embotado su sentido de la historia, veían a Aristóteles y a Ptolomeo casi como contemporáneos. Uno y otro aparecen como exponentes de una misma tradición —la de la “antigua sabiduría”— y las diferencias existentes entre sus respectivos sistemas se convierten prácticamente en contradicciones internas dentro de un mismo cuerpo doctrinal. Los cambios que Ptolomeo había considerado como productos naturales de la evolución del conocimiento a lo largo de los cinco siglos que le separan de Aristóteles, aparecían ante los ojos de los escolásticos como simples contradicciones que, a su vez, planteaban nuevos problemas de reconciliación. Puesto que con el paso del tiempo dicha reconciliación se mostró difícil y poco concluyente, las aparentes contradicciones, lo mismo que otros conflictos surgidos en el pensamiento medieval, acabaron por

contribuir a un generalizado sentimiento de duda sobre el conjunto global de la tradición antigua.

Tal como renació en la Edad Media, la tradición antigua del saber había adquirido un aspecto enteramente nuevo y las páginas precedentes indican de forma explícita que algunas de las novedades importantes derivaban de la mera necesidad de renovación. Pero dentro de la renovada tradición también se dieron una serie de cambios más substanciales que los apuntados y que fueron provocados por las características autóctonas de la Edad Media y del Renacimiento. Por ejemplo, si bien la ciencia jugó un importante papel en el pensamiento de finales de la Edad Media, no debe olvidarse que las fuerzas intelectuales dominantes eran teológicas y que la práctica de las ciencias en un medio ambiente teológico mudó, al unísono, las fuerzas y las flaquezas de la tradición científica. Por otro lado, la ciencia medieval no era intrínsecamente estática. Las críticas escolásticas a la obra de Aristóteles ofrecieron alternativas importantes para algunos de sus puntos de vista, y parte de tales alternativas desempeñó una función de máxima importancia en la preparación del camino a Copérnico. Alrededor del siglo XVI entran en escena nuevas fuerzas intelectuales, económicas y sociales, algunas de las cuales tienen una muy estrecha relación con los problemas de la astronomía y el movimiento de la tierra. Tales cambios piden un tratamiento particularizado, del que nos ocuparemos acto seguido.

La astronomía y la Iglesia

Durante toda la Edad Media y gran parte del Renacimiento, la Iglesia católica fue la autoridad intelectual dominante en toda Europa. Los eruditos europeos medievales eran miembros del clero; las universidades en las que encontraba cobijo y tribuna la ciencia antigua pertenecían a la Iglesia. Desde el siglo IV al XVII, la actitud de la Iglesia respecto a la ciencia en general y a la estructura del universo en particular fue un factor determinante en el progreso o estancamiento de la astronomía. Sin embargo, ni la actitud ni el comportamiento concreto de la Iglesia frente a tales

materias se mantuvo uniforme a lo largo de dichos siglos. Una vez terminada la época de oscurantismo medieval, la Iglesia comenzó a defender una tradición sabia tan abstracta, sutil y rigurosa como cualquiera de las que haya conocido el mundo; sin embargo, hasta el siglo X, y nuevamente a partir del siglo XVI, la influencia ejercida por la Iglesia fue, por lo general, hostil a la ciencia. La teoría copernicana se desarrolló en el marco de una tradición científica apadrinada y apoyada por la Iglesia; el propio Copérnico era sobrino de un obispo y canónigo de la catedral de Frauenburgo. A pesar de ello, la Iglesia condenó en 1616 todos los libros que abogaban a favor de la existencia real de un movimiento terrestre. La abrumadora influencia de la Iglesia sobre la ciencia no puede ser abarcada por ninguna generalización, pues cambió constantemente a medida que lo iba haciendo la propia situación de la Iglesia.

Durante los primeros siglos de la era cristiana los Padres de la Iglesia actuaban a modo de cruzados y prosélitos de una nueva fe, por cuya existencia y supervivencia luchaban. El papel social que desempeñaban exigía que despreciaran el saber pagano de quienes les habían precedido y que prestaran la máxima atención al enfoque que daban a los problemas de la teología cristiana los cada vez más escasos representantes de la tradición cultural. Por otro lado, estaban absolutamente persuadidos de que las Escrituras y la exégesis católica encerraban todos los conocimientos necesarios para la salvación. La ciencia era para ellos un saber profano; salvo cuando era necesaria para la vida cotidiana, era, en el mejor de los casos, inútil, y, en el peor, una peligrosa distracción. En consecuencia, san Agustín, el más influyente entre los primeros Padres de la Iglesia, da el siguiente consejo a los fieles en su *Enchiridon*, o manual para uso de los cristianos:

Así pues, cuando el problema que se nos plantea es saber qué creemos en materia de religión, no es necesario sondear la naturaleza de las cosas tal como han hecho aquellos a los que los griegos denominaban *physici*; ni debemos alarmarnos por más tiempo de que los cristianos ignoren la fuerza

y el número de los elementos, el movimiento, el orden y los eclipses de los cuerpos celestes, las especies y naturalezas de animales, plantas, piedras, fuentes, ríos y montañas, la cronología y las distancias, los signos que anuncian la proximidad de las tormentas u otras mil cosas que tales filósofos han descubierto o creen haber descubierto […] Al cristiano le basta con creer que la única causa de todas las cosas creadas, celestes o terrestres, visibles o invisibles, es la bondad del Creador, el único Dios verdadero, y que nada existe, salvo Él mismo, cuya existencia no tenga su origen en Él.[4.1]

Esta actitud no era incompatible con un conocimiento admirativo de la ciencia antigua. El propio san Agustín había estudiado con atención la ciencia griega, y en su obra nos da testimonios de la admiración que sentía por su precisión y alcance; sin embargo, su actitud era de todo punto incompatible con un estudio activo de los problemas científicos, lo que facilitó que en la mayoría de los casos se prestara sin esfuerzo alguno a mantener una postura negativa. En las obras de sus contemporáneos y sucesores menos liberales que él, la depreciación espiritual de la ciencia pagana iba generalmente a la par con un rechazo total de su contenido. La astronomía, por su vinculación con la astrología, era especialmente despreciada, pues el explícito determinismo de ésta difícilmente podía hacerla compatible con la doctrina cristiana.

Por ejemplo, a principios del siglo IV, Lactancio, preceptor del hijo del emperador Constantino, consagró el tercer libro de sus *Divinae institutiones* a glosar “la falsa sabiduría de los filósofos”, reservando un capítulo a la ridiculización de la idea de la esfericidad de la tierra. Para él era suficiente con subrayar el absurdo de que existiera una región en que los hombres estuvieran suspendidos cabeza abajo y el cielo se encontrara por debajo de la tierra. Posteriormente, también dentro del siglo IV, el obispo de Gabala llegó a idénticas conclusiones extrayendo sus pruebas de la Biblia. El cielo no es una esfera, es una tienda de campaña o un tabernáculo, pues “es Él […] quien tiende el cielo como una cortina y lo despliega como una tienda

de campaña” (Isaías 40:22). Hay “aguas […] sobre el firmamento” (Génesis 1:7). La tierra es plana, pues “el sol se había elevado sobre la tierra cuando Lot entró en Zoar” (Génesis 19:23). En pleno siglo VI, Cosmas Indicopleustes, un monje de Alejandría, podía reemplazar el sistema pagano por una detallada cosmología cristiana extraída, en sus principales rasgos de la Biblia. Su universo tiene la forma del tabernáculo que Dios mandó construir a Moisés en el desierto. Tiene un fondo plano, paredes perpendiculares y un techo semicilíndrico, como los baúles de antaño. La tierra, escabel del Señor, es una superficie rectangular plana de longitud doble que su anchura, y reposa sobre el fondo liso del universo. Durante la noche el sol no pasa por debajo de la tierra siguiendo su trayectoria, sino que se esconde detrás de las regiones más septentrionales, zonas más elevadas que las meridionales.

Cosmologías como las de Lactancio y Cosmas Indicopleustes jamás se convirtieron en la doctrina oficial de la Iglesia ni tampoco reemplazaron de forma total y completa el antiguo universo de las esferas que sobrevive en descripciones fragmentarias dentro de las más eruditas enciclopedias medievales. En lo que concierne a la cosmología, durante la primera mitad de la Edad Media no existió ningún tipo de unanimidad entre los cristianos; la ciencia y la cosmología no habían alcanzado la suficiente importancia como para exigirla. No obstante, aunque cosmologías como las que acabamos de apuntar, en las que las más ingenuas ideas se unen a un conocimiento superficial de las Escrituras nunca llegaran a ser oficiales, no por ello deben dejar de ser tomadas como representativas de la decadencia en que había caído la ciencia profana durante la Alta Edad Media. Por otra parte, nos preparan el terreno para comprender con qué sorpresa y temor acogieron los últimos eruditos cristianos el redescubrimiento de la ciencia antigua en los siglos XI y XII.

La actitud de la Iglesia frente a la sabiduría pagana ya había cambiado cuando la Europa cristiana reestableció los vínculos culturales y comerciales con la Iglesia oriental, radicada en Bizancio, y con los musulmanes instalados en España, Siria y África. La mayor parte de la población de Europa continental se había convertido al cristianismo; la

autoridad espiritual e intelectual de la Iglesia era total; la jerarquía de la administración eclesiástica se había fijado y consolidado. La ciencia pagana y seglar dejaba de ser una amenaza siempre que la Iglesia pudiera seguir manteniendo su liderazgo intelectual a través de la integración de las concepciones procedentes de aquella. En consecuencia, los eclesiásticos ocuparon parte del ocio que les proporcionaba la nueva prosperidad en el estudio activo del redescubierto saber y, ampliando la gama de los conocimientos aceptables dentro de una erudición de corte cristiano, mantuvieron a lo largo de más de cinco siglos el monopolio católico sobre la ciencia. En el siglo XI, “la naturaleza de las cosas”, expresión bajo la que se englobaban el estudio de los cielos y el de la tierra, pasó nuevamente a ser un objeto de estudio intensivo. Al llegar el siglo XIII, si no antes, las líneas maestras del universo de las dos esferas eran admitidas de nuevo como tema de debate en las discusiones entre cristianos cultivados. Durante las últimas centurias de la Edad Media, el marco de la vida cristiana, terrestre y celeste a un mismo tiempo, era un universo completamente aristotélico.

Al proceso mediante el cual los cristianos descubrieron que vivían en un universo aristotélico le hemos dado el nombre de redescubrimiento, pero ciertamente “redescubrimiento” no es el término más adecuado. Quizá sea más correcto hablar aquí de una auténtica revolución que afectaba tanto al pensamiento cristiano como a la tradición científica antigua. A partir del siglo IV, Aristóteles, Ptolomeo y otros pensadores griegos habían sufrido ataques eclesiásticos por los conflictos que planteaban a las Escrituras sus opiniones en materia de cosmología. Estas divergencias seguían existiendo en los siglos XII y XIII. En 1210, un concilio provincial celebrado en París prohibió la enseñanza de la física y la metafísica aristotélicas. En 1215, el cuarto concilio de Letrán publicó un edicto anti-aristotélico similar, aunque más restringido. A lo largo de todo el siglo, otras varias prohibiciones fueron promulgadas por el papado, que, aunque formales y sin demasiado éxito en cuanto a sus objetivos, no dejan de ser significativas. Tales edictos testimonian la imposibilidad de limitarse a una simple superposición del

saber profano de la antigüedad y de la teología cristiana medieval. Los textos antiguos y las Escrituras debían modificarse al unísono para forjar la estructura de un nuevo dogma cristiano coherente. Una vez completada esta nueva estructura, la teología se había convertido en un importante baluarte del antiguo concepto de una tierra central e inmóvil.

La estructura física y cosmológica del nuevo universo cristiano era básicamente aristotélica. Santo Tomás de Aquino (1225-1274), el escolástico que contribuyó de forma más decisiva a montar la trama de dicha estructura, describe la perfección y el apropiado carácter de los movimientos celestes en términos que, excepto por su claridad, muy bien podrían haber sido escritos por el propio Aristóteles:

Por consiguiente, se desprende de la naturaleza intrínseca del material de los cielos la imposibilidad de generación y corrupción en los mismos, puesto que es el primer tipo de cuerpos alterables y el más similar por su naturaleza a los intrínsecamente inmutables. [El único cuerpo auténticamente inmutable en el universo cristiano es Dios, del que procede todo cambio en la tierra y en el cielo.] De ahí que los cielos sólo experimenten el mínimo absoluto de cambios. El movimiento es su única alteración, y ésta [a diferencia de los cambios de dimensión, peso, color, etc.] no modifica en lo más mínimo su naturaleza intrínseca. Además, de todos los tipos de movimiento a los que podría verse sometido, el suyo es el circular, el que produce un mínimo de alteraciones ya que la esfera, considerada como un todo, no cambia de lugar.[4.2]

Aristóteles no siempre podía ser tomado de forma tan literal. Por ejemplo, no fueron pocos los escolásticos que se vieron forzados a abandonar la prueba aristotélica de la imposibilidad absoluta de que existiera un vacío porque parecía limitar de forma arbitraria el infinito, poder divino. Ningún cristiano podía aceptar el punto de vista de Aristóteles según el cual el universo existía desde toda la eternidad. Las primeras palabras de la Biblia son: “En un principio Dios creó los cielos y la tierra”.

Por otro lado, la creación era un ingrediente esencial en la explicación católica de la existencia del mal. Y Aristóteles no podía imponerse en materia de tal importancia. El universo había sido creado en un momento determinado, existía un primer instante en el tiempo. Sin embargo, lo más frecuente era que cediera la Biblia, generalmente al amparo de una interpretación metafórica. Por ejemplo, discutiendo el texto bíblico “que exista un firmamento entre las aguas, y que separe las aguas de las aguas” (Génesis 1:6), Tomás de Aquino empieza por esbozar una teoría cosmológica que preserve el sentido literal del pasaje, para continuar en los siguientes términos:

Sin embargo, puesto que puede demostrarse con sólidos razonamientos que dicha teoría es falsa, no puede afirmarse que éste sea el sentido de las Sagradas Escrituras. Antes bien, debería considerarse que Moisés se dirigía a gentes ignorantes y que en consideración a su debilidad sólo les hablaba de cosas captables por los sentidos. Incluso los más ignorantes perciben con sus sentidos que la tierra y el agua son cuerpos materiales, mientras que ya no es tan evidente que el aire también sea un cuerpo material […]. Así pues, Moisés menciona de forma explícita el agua y la tierra, pero no habla para nada del aire con el fin de no presentar a personas ignorantes algo que esté más allá de su capacidad de conocimiento.[4.3]

Si leemos “agua” como “aire” o “substancia transparente”, queda preservada la integridad de las Escrituras. No obstante, en este proceso la Biblia se convierte, en cierto sentido, en un instrumento de propaganda elaborado para uso de un público ignorante. El procedimiento ilustrado por el anterior ejemplo es típico, y los escolásticos lo emplearon un sinfín de veces.

El meticuloso cuidado con que Tomás de Aquino y sus contemporáneos se lanzaron a la tarea de una reconciliación queda ilustrado con toda claridad por las dificultades con que tropezaron en la explicación bíblica de la Ascensión. Según las Escrituras, Cristo “ascendió más allá de todos los

cielos para completar todas las cosas” (Carta a los Efesios 4:10). Tomás de Aquino consiguió ajustar este fragmento de la historia cristiana a un universo de esferas, pero para conseguirlo tuvo que resolver muchos y variados problemas, entre ellos el siguiente:

No parece demasiado adecuado a la naturaleza de Cristo afirmar que ascendió a los cielos, pues el filósofo [Aristóteles] dice (*Del cielo*, libro II) que *las cosas que están en un estado de perfección poseen su bien sin movimiento*. Pero Cristo estaba en un estado de perfección […]. Por consiguiente, tenía su bien sin movimiento. Pero la ascensión es movimiento, de donde se desprende cuán impropio era para Cristo ascender […].

Además, tal como se demuestra en el libro I *Del cielo*, no hay lugar alguno por encima del cielo. Pero todo cuerpo debe ocupar un lugar. Por consiguiente, el cuerpo de Cristo no ascendió por encima de todos los cielos […].

Además, dos cuerpos no pueden ocupar un mismo lugar. Puesto que no hay forma de pasar de un lugar a otro si no es a través del espacio intermedio, no parece posible que Cristo se haya elevado más allá de todos los cielos a menos que [las esferas de cristal de] éstos se hayan dividido, lo cual es imposible.[4.4]

Las respuestas dadas por Santo Tomás de Aquino no vienen al caso. Son las propias objeciones que se plantea las que nos sorprenden, en particular si pensamos que la Ascensión es sólo uno de los muchos aspectos de la historia de Cristo que presentan dificultades y que Santo Tomás de Aquino es el más grande entre los muchos católicos que se ocuparon de la resolución de las mismas. La *Summa theologica* de Tomás de Aquino, de la que se han extraído la mayor parte de las citas anteriores, es un compendio del saber cristiano muy a menudo reunido en doce gruesos volúmenes. En cada uno de ellos aparece continuamente el nombre de Aristóteles (o la aún más reveladora referencia al “Filósofo”). Sólo a través de obras como la que

nos ocupa, la ciencia antigua y en particular la aristotélica volvieron a convertirse en pilares del pensamiento occidental.

Tomás de Aquino y sus contemporáneos certificaban la compatibilidad de la fe cristiana con la mayor parte de la ciencia de la antigüedad. Al situar a Aristóteles dentro de la más plena ortodoxia, permitían que su cosmología se convirtiera en un elemento creador dentro del pensamiento cristiano. No obstante, el extremo detalle y erudición con que estaban confeccionadas sus obras oscurecían la estructura general del nuevo universo cristiano que comenzaba a emerger a finales de la Edad Media. Si queremos comprender con mayor profundidad las razones que motivaron la influencia ejercida sobre el espíritu medieval y renacentista por dicho universo —incluyendo la noción de una tierra central e inmóvil—, necesitamos adoptar un punto de vista más amplio y difícilmente detectable limitándonos a un estudio del siglo XIII. Dicha perspectiva sólo se desarrolló una vez autorizada la difusión de la obra de Aristóteles, apareciendo quizá por primera vez, y sin duda alguna en su forma más enérgica, en la obra de Dante, en particular en su gran poema épico, la *Divina Comedia*.

Tomada en sentido literal, la epopeya de Dante describe el viaje del poeta a través del universo, representado según la concepción cristiana del siglo XIV. El viaje del poeta comienza en la superficie de la tierra esférica; a continuación desciende gradualmente hacia el interior del globo terrestre atravesando los nueve círculos del Infierno, simétricos a las nueve esferas celestes situadas por encima de la superficie terrestre;[*] al final de su descenso alcanza la más vil y corrompida de todas las regiones, el centro del universo, lugar ocupado por el Demonio y sus cohortes. Acto seguido Dante regresa a la superficie de la tierra, apareciendo en un punto diametralmente opuesto al de su partida, y encuentra allí la montaña del Purgatorio, cuya base está sobre la tierra y cuya cima alcanza las regiones aéreas que envuelven al globo terrestre. El poeta pasa a través del Purgatorio, atraviesa las esferas del aire y del fuego y alcanza la región celeste situada por encima de éstas. Finalmente, viaja ordenadamente a través de cada una de las esferas celestes, donde conversa con los espíritus que moran en ellas, hasta que su recorrido culmina con la visión del trono

de Dios, situado en la más elevada de las esferas, el Empíreo. El marco escénico de la *Divina Comedia* es un universo literalmente aristotélico adaptado a los epiciclos de Hiparco y al Dios de la Santa Iglesia.

Sin embargo, para el cristiano el nuevo universo era tan simbólico como literal, y Dante perseguía por encima de todo plasmar dicho simbolismo cristiano. La *Divina Comedia*, a través de la alegoría, puso de manifiesto que el universo medieval no podía tener otra estructura que la enunciada por Aristóteles y Ptolomeo. Tal como nos lo plasma el poeta, el universo de las esferas refleja a un mismo tiempo la esperanza y el destino del hombre. Física y espiritualmente, el hombre ocupa una crucial posición intermedia en este universo colmado por una cadena jerárquica de substancias, que van desde la inerte arcilla de su centro hasta el espíritu puro situado en el Empíreo. El hombre está formado por un cuerpo material y un alma espiritual; todas las demás substancias son materia o espíritu. El lugar ocupado por el hombre dentro del universo también es intermedio; la superficie de la tierra está cerca del centro de aquél, región vil y material, aunque sigue siendo visible desde la periferia celeste que le envuelve simétricamente. El hombre vive en la miseria y la incertidumbre, estando su morada muy próxima al Infierno; con todo, su habitat central es estratégico, pues esté donde esté, permanece siempre bajo la mirada de Dios. La doble naturaleza del hombre y la situación intermedia que ocupa imponen la elección inherente al drama cristiano. El hombre puede escoger entre ponerse a merced de los impulsos de su naturaleza corporal y terrestre, siguiéndola hasta su lugar natural —el corrompido centro del universo—, o dejarse arrastrar por su alma hacia las alturas a través de esferas cada vez más espirituales hasta alcanzar el trono divino. Tal como ha dicho un crítico de Dante, en la *Divina Comedia* “el más imponente y amplio de sus temas, el del pecado y la salvación humanos, está perfectamente amoldado al gran plan del universo”.[4.5] Una vez ha tomado cuerpo tal concordancia, todo cambio en el diseño general del universo afectaría de forma inevitable al drama de la vida y de la muerte cristianas. Para romper la cadena continua de la creación, bastaba con adjudicar movimiento a la tierra.

No existe otro aspecto más difícil de asimilar dentro del pensamiento medieval que el simbolismo a través del cual se reflejaba la naturaleza y el destino del hombre, el microcosmos, dentro de la estructura del universo, el macrocosmos. Quizá no podamos penetrar de forma más profunda la plena significación con que tal simbolismo religioso revestía las esferas aristotélicas, pero como mínimo podemos evitar ver en él una serie de simples metáforas o creer que fuera de la astronomía no jugaba ningún papel activo dentro del pensamiento cristiano. Una de las obras de Dante en prosa, en parte escrita a modo de manual técnico destinado a servir de ayuda a sus contemporáneos para descifrar su producción en verso, cierra del siguiente modo una descripción literalmente física de las esferas y de los epiciclos empleados por la astronomía medieval:

No obstante, más allá de todas estas [esferas cristalinas], los católicos colocan el Empíreo […] y admiten que permanece en reposo porque en todas y cada una de sus partes tiene consigo lo que le pide su materia. Ésta es la razón por la que el *primum mobile* [o la novena esfera] se mueve con tan gran velocidad, pues el anhelo que sienten todas sus partes por unirse con las del cielo más tranquilo la hace girar con tan gran deseo que su velocidad es casi inconmensurable. Este reposado y pacífico cielo es la sede de la suprema Divinidad, la única que puede contemplarse a sí misma con toda perfección.[4.6]

En el pasaje precedente, el astrónomo sitúa la posición (y también las dimensiones) de la morada de Dios, convirtiéndose en teólogo por un momento. A lo largo de los siglos XIV y XV, las funciones teológicas del astrónomo no siempre se limitaban a medir el cielo. Dante y alguno de sus contemporáneos también dirigieron sus ojos hacia la astronomía para descubrir en ella el tipo, y algunas veces incluso el número, de los ángeles que habitaban en el reino espiritual de Dios.

En uno de los pasajes del *Convivio*, situado inmediatamente después de la descripción de las esferas que acabamos de citar, Dante esboza una teoría

típicamente medieval sobre la relación entre la jerarquía espiritual y las esferas:

Puesto que se ha demostrado en el capítulo anterior la naturaleza de este cielo y su ordenación interna, nos queda por ver quiénes son los responsables de su movimiento. Ante todo, debe saberse que los motores del cielo son substancias separadas de la materia; es decir, inteligencias, a las que la gente denomina vulgarmente ángeles […]. El número, los órdenes y las jerarquías [de estos seres angélicos] son los que narran los cielos móviles, que son nueve, mientras que el décimo anuncia la unidad y estabilidad de Dios. Por esta razón dice el salmista: “Los cielos narran la gloria de Dios y el firmamento anuncia las obras salidas de sus manos”.

Así pues, es razonable creer que los poderes motrices [es decir, los seres que mueven las esferas] del cielo de la Luna son los ángeles, mientras que los del cielo de Mercurio son los arcángeles, los tronos para el de Venus […]. Y estos tronos, destinados a gobernar dicho cielo [el de Venus] no son demasiados en número. Sobre este aspecto, los astrólogos [o astrónomos] discrepan según sus particulares opiniones acerca de las revoluciones [de este cielo], aunque todos estén de acuerdo en que dicho número es igual al de los movimientos que efectúa el cielo. Según se afirma en el *Libro de las agrupaciones de estrellas*, tales movimientos son tres […]: uno mediante el cual la estrella recorre su epiciclo; otro que hace que el epiciclo y la totalidad del cielo de Venus se muevan a un mismo tiempo acompañando al sol; el tercero responsable del movimiento global del cielo siguiendo el movimiento [precesional] de la esfera estelar, que tiene lugar de oeste a este a razón de un grado cada cien años. Estos tres movimientos tienen tres poderes motrices [que son tres miembros del orden angélico de los tronos]. [4.7]

Cuando los ángeles se convierten en la fuerza motriz de epiciclos y deferentes, la variedad de criaturas espirituales pertenecientes a las legiones divinas puede aumentar en función de la complejidad de la teoría

astronómica. Admitir un movimiento terrestre, puede conducir a la admisión de un movimiento del trono de Dios.

La crítica escolástica de Aristóteles

Los efectos de la erudición medieval no siempre eran tan conservadores como la integración que convirtió a la teología en uno de los bastiones del universo de las dos esferas. Aristóteles y sus comentadores eran el punto de partida invariable de la investigación escolástica, aunque a menudo se limitaban sólo a ser esto. El propio ardor con que eran estudiados los textos de Aristóteles garantizaba la rápida detección de las incongruencias de su doctrina o de sus demostraciones; incongruencias que muchas veces se convirtieron en el fundamento de nuevas realizaciones creativas. Los eruditos medievales apenas habían entrevisto las novedades astronómicas y cosmológicas que pondrían sobre el tapete sus sucesores de los siglos XVI y XVII. Sin embargo, ampliaron el campo de la lógica aristotélica, descubrieron errores en sus razonamientos y rechazaron un buen número de sus explicaciones a causa de su desajuste con las pruebas proporcionadas por la experiencia. Paralelamente, forjaron un buen número de conceptos e instrumentos que se revelaron esenciales para los futuros logros científicos de hombres como Copérnico o Galileo.

Por ejemplo, es posible encontrar importantes anticipaciones al pensamiento copernicano en el comentario crítico al tratado *Del cielo* de Aristóteles, escrito durante el siglo XIV por Nicolás de Oresme, miembro de la importante escuela nominalista de París. El método seguido por Oresme es típicamente escolástico. En su largo manuscrito, divide el texto aristotélico en fragmentos; cada fragmento, compuesto por unas pocas frases, está separado de los restantes por largos comentarios explicativos y críticos. El lector descubre una vez llegado al final de la obra que Oresme está de acuerdo con Aristóteles en casi todos los puntos esenciales, excepto en lo que concierne al problema de la Creación. Sin embargo, las razones que le empujan a compartir el punto de vista aristotélico están lejos de ser

claras; la brillante crítica de Oresme ha destruido varias de las demostraciones de Aristóteles y sugerido importantes alternativas para un buen número de sus opiniones. Dichas alternativas raramente fueron adoptadas por los propios escolásticos, aunque el hecho de que los eruditos medievales continuaran discutiéndolas contribuyó a crear un estado de opinión en cuyo seno los astrónomos podían experimentar con la idea de una tierra en movimiento.

Por ejemplo, Nicolás de Oresme criticaba por completo el principal argumento aristotélico sobre la unicidad de la tierra.[4.8] Aristóteles afirmaba que, en caso de existir dos tierras en el espacio (y cuando la tierra se convierte en un planeta lo que hay son seis “tierras”), ambas caerían hacia el centro del universo para unirse en una sola, pues la tierra tiende de modo natural a ocupar el centro del espacio. Esta demostración, dice Oresme, no tiene validez alguna, pues presupone una teoría del movimiento que no ha sido probada. Quizá la tierra no tienda naturalmente hacia el centro, sino hacia otros fragmentos de tierra próximos. Nuestra tierra tiene un centro, y tal vez sea hacia él, independientemente de la posición que ocupe dentro del universo, donde se dirigen todas las piedras abandonadas libremente. Según esta teoría oresmiana, el movimiento natural de un cuerpo se halla gobernado, no por la posición que ocupa en un espacio aristotélico absoluto, sino por su posición relativa con respecto a otros fragmentos de materia. Esta tesis representa algo así como un requisito previo para las nuevas cosmologías de los siglos XVI y XVII; cosmologías en las que la tierra había perdido sus características de unicidad y centralidad. Teorías similares en varios aspectos son comunes en los textos de Copérnico, Galileo, Descartes y Newton.

Nos enfrentamos con anticipaciones aún más importantes a los futuros argumentos copernicanos cuando Oresme critica la refutación por parte de Aristóteles de las tesis de Heráclides el pitagórico, quien había explicado el movimiento diario de las estrellas postulando una rotación axial hacia el este de la tierra central. Oresme no cree en la rotación de la tierra, o al menos así lo dice, aunque intenta demostrar que la elección entre una tierra inmóvil y una tierra en rotación debe ser una simple cuestión de fe. Ningún

argumento, dice, sea lógico, físico, o incluso bíblico, puede refutar la posibilidad de una rotación diaria de la tierra. Por ejemplo, nada puede concluirse del movimiento aparente de las estrellas pues, dice Oresme:

Parto del supuesto de que el movimiento local sólo puede ser percibido cuando un cuerpo altera su posición con respecto a otro. Por tal razón, un hombre situado sobre un navío *a* que se mueva con uniformidad, rápida o lentamente, y que tan sólo puede ver otro navío *b* que se mueva del mismo modo que *a*, […] tendrá la sensación de que ninguna de ambas naves está en movimiento. Si *a* está en reposo y *b* en movimiento, creerá que *b* se mueve; pero si es *a* el que está en movimiento y *b* el que permanece en reposo, seguirá creyendo, como en el caso anterior, que *a* está en reposo y *b* es el que se mueve […]. Así pues, afirmo que si, de las dos partes del universo mencionado anteriormente, la superior [o celestial] gozara hoy de movimiento diario, tal como es el caso, mientras que la inferior [o terrestre] permaneciera en reposo, y si mañana se invirtiera la situación y la parte inferior gozara de movimiento mientras que la otra, el cielo, careciera de él, seríamos incapaces de apercibirnos en lo más mínimo de tal mutación, pues lo mismo veríamos hoy que mañana. En uno y otro caso, tendríamos la sensación de que permanece en reposo la parte sobre la que estamos situados mientras se mueve la parte restante del universo, de forma totalmente idéntica a lo que le sucede a un hombre a bordo de una nave que cree ver en movimiento los árboles situados en la orilla.[4.9]

Se trata de un argumento basado en la relatividad óptica que desempeña un papel de primer orden en las obras de Copérnico y Galileo. No obstante, Nicolás de Oresme no se detiene una vez llegado a este punto. Acto seguido emprende un demoledor ataque contra un argumento aristotélico aún más importante, el que deriva la inmovilidad de la tierra del hecho de que un objeto lanzado verticalmente hacia arriba caiga siempre al suelo sobre su punto de partida:

[En respuesta al argumento de Aristóteles y de Ptolomeo] se diría que la flecha lanzada hacia arriba [también] se mueve rápidamente hacia el este junto con el aire que atraviesa y con toda la masa del mundo inferior [o terrestre] animada de movimiento diario de rotación. Por consiguiente, la flecha regresa a su punto de partida sobre la superficie terrestre. Tal afirmación parece posible por analogía, pues si un hombre situado sobre una nave que, sin él percatarse, se desplazara con gran rapidez hacia el este, girara su mano hacia abajo describiendo una línea recta sobre el mástil de la nave, tendría la sensación de que aquélla sólo está animada de un movimiento vertical; y por esta razón, nos parece que la flecha desciende o sube según la vertical perfecta.[4.10]

La célebre defensa galileana del sistema de Copérnico, el *Diálogo sobre los Dos Principales Sistemas del Mundo*, está llena de argumentos del mismo tipo que el precedente. Galileo muy bien pudo haber elaborado sus razonamientos en base a los de los predecesores escolásticos de Copérnico, entre ellos Oresme. Sin embargo, cuanto acabamos de indicar no convierte a Oresme en un Copérnico. Nicolás de Oresme no deduce de sus críticas la rotación cotidiana de la tierra; no sueña en un movimiento orbital alrededor del centro del universo ni es capaz de vislumbrar el beneficio que podrían extraer los astrónomos de una tierra móvil Sobre este último punto, no comparte ni por asomo las motivaciones de Copérnico, aspecto que no hace más que incrementar el asombroso carácter de la obra de Oresme. Cuando los argumentos de Oresme reaparecen en las obras de Copérnico y Galileo, tienen una función diferente y más creativa. Estos últimos querían demostrar que la tierra *podía moverse* a fin de explotar las ventajas astronómicas que se derivarían de tal situación si, de hecho, *estaba en movimiento*. Nicolás de Oresme sólo quería mostrar que la tierra *podía moverse*, sólo pretendía investigar la demostración de Aristóteles. Como otras muchas de las más fecundas contribuciones de la ciencia escolástica, los argumentos “copernicanos” de Oresme eran producto de la preeminencia que el pensamiento de la baja Edad Media otorgaba a Aristóteles. Quienes comulgaban con las conclusiones de Aristóteles sólo

estudiaban sus demostraciones porque habían sido efectuadas por el maestro. No obstante, tales investigaciones contribuyeron frecuentemente a asegurar la caída final del maestro.

Desde luego, no podemos asegurar si Copérnico y Galileo conocieron la obra de Nicolás de Oresme. La tradición que obliga al erudito o al científico a citar sus fuentes de información no se estableció hasta mucho después de la revolución científica de los siglos XVI y XVII. Sin embargo, fueron muchos los críticos escolásticos de la obra de Aristóteles, muy numerosos los manuscritos que dejaron y también abundantes las copias que de los mismos se hicieron en épocas posteriores. Cinco siglos y medio después de haberse redactado el comentario de Nicolás de Oresme aún existen seis copias manuscritas que datan de la Edad Media y varias que datan del siglo XV, posteriores, por consiguiente, a la muerte de Oresme. Parece, pues, lógico suponer que existieran abundantes copias de dicha obra en la época de Copérnico. Además, la tradición de la crítica escolástica viene caracterizada por la continuidad. Los conceptos clave emergidos en París en el siglo XIV reaparecen en Oxford también a lo largo del siglo XIV y en Padua durante los siglos XV y XVI. Copérnico estudió en Padua y Galileo enseñó allí. Aunque no tengamos la seguridad de que Copérnico haya extraído tal o cual argumento particular de su *De revolutionibus* de tal o tal otro crítico escolástico, no cabe duda de que éstos, en su conjunto, han facilitado la eclosión de sus tesis. Como mínimo, lo cierto es que los críticos escolásticos crearon un estado de opinión en el que temas tales como el movimiento terrestre se habían convertido en tema de discusión en todas las universidades. Es pues bastante probable que Copérnico tomara literalmente algunos de sus argumentos clave de fuentes anteriores y desconocidas.

Nuestra discusión sobre Nicolás de Oresme ilustra a la perfección el tipo más característico de crítica escolástica: la comprobación de las demostraciones de Aristóteles y la búsqueda de posibles doctrinas alternativas, generalmente descartadas una vez se ha demostrado su posibilidad lógica. Sin embargo, no toda la ciencia medieval se hallaba

vinculada a este limitado, y quizá evanescente, tipo de crítica. Los escolásticos también introdujeron algunos nuevos campos de investigación y ciertas modificaciones doctrinales permanentes en la tradición científica aristotélica. Las más significativas afectan a los dominios de la cinemática y la dinámica, cuyo objeto es estudiar el movimiento de los cuerpos pesados sobre la tierra (desde la Edad Media) y en el cielo. Algunas de las más importantes aportaciones de Galileo, en particular su obra sobre la caída de los cuerpos, pueden ser consideradas con toda justicia como un reagrupamiento creativo de los hasta entonces dispersos conocimientos físicos y matemáticos arduamente elaborados por los científicos medievales. No obstante, antes de que Galileo los reuniera en el seno de una nueva dinámica, uno de tales esquemas conceptuales, la teoría del *impetus*, ya había ejercido una notable, si bien indirecta, influencia sobre el pensamiento astronómico.

La teoría del *impetus* fue erigida sobre los restos de una de las explicaciones más débiles del *corpus* físico de Aristóteles, la explicación dada al movimiento de los proyectiles. Aristóteles había creído que, a menos que se vea sometida a una fuerza exterior, una piedra permanece en reposo o se desplaza en línea recta hacia el centro de la tierra. Se trataba de una explicación natural para un gran número de fenómenos, pero no tardó demasiado tiempo en revelarse inadecuada para interpretar el comportamiento observado de un proyectil. La piedra, cuando abandona la honda o la mano, no cae verticalmente hacia el suelo, sino que continúa desplazándose en la dirección hacia la cual ha sido inicialmente impulsada, incluso una vez roto el contacto inicial con el elemento propulsor (honda o mano). Aristóteles, que era un perspicaz observador, sabía perfectamente cuál era el comportamiento real de un proyectil, y corrigió su teoría imaginando que el aire perturbado era la fuente del impulso que prolonga el movimiento del proyectil una vez perdido todo contacto con el elemento propulsor. Parece ser que tal solución nunca la encontró demasiado satisfactoria, pues propuso como mínimo dos versiones incompatibles entre sí y siempre se mostró abierto a la discusión de este punto. Sin embargo, para Aristóteles, el problema del movimiento de los proyectiles jamás fue

demasiado importante; los problemas que fundamentalmente le preocupaban eran otros, y en apariencia sólo abordó de forma marginal la cuestión de los proyectiles porque podía crearle ciertas dificultades para su teoría general.

En efecto, parece ser que el problema que nos ocupa creó dificultades casi de inmediato. Juan Filopón, el comentarista cristiano del siglo VI que registra el primer enfrentamiento con la teoría de Aristóteles, atribuye su propia solución parcial a la teoría del *impetus* al astrónomo helenístico Hiparco. La mayor parte de los comentaristas restantes se vio como mínimo desazonada por este aspecto del pensamiento aristotélico. Quizá nadie, ni el propio Aristóteles, haya tomado nunca en serio la idea del aire actuando como propulsor. No obstante, hasta el siglo XIV, cuando las dificultades planteadas por los textos aristotélicos se convirtieron por derecho propio en auténticos problemas, no se abordará de frente el movimiento de los proyectiles, resolviéndose mediante la introducción de una modificación substancial en la teoría de Aristóteles. Aunque en su origen se tratara de un problema de física terrestre, la modificación indicada no tardó en manifestar notorias implicaciones en el campo astronómico.

Pueden encontrarse la exposición del problema y su resolución medieval expuestas con gran brillantez y lujo de detalles, en las *Cuestiones sobre los ocho libros de la física de Aristóteles* (un típico título de la ciencia escolástica) de Jean Buridan, el maestro de Nicolás de Oresme:

Se pretende saber si un proyectil, una vez abandona la mano de quien lo arroja, sigue en movimiento por acción del aire o de cualquier otra causa […]. Creo que tal pregunta es muy difícil de responder, pues Aristóteles, según mi parecer, no ha sabido resolver satisfactoriamente el problema […]. Sostiene [en cierto momento] que el proyectil abandona con toda rapidez la posición que ocupaba y que la naturaleza, que no tolera vacío alguno, envía de inmediato el aire tras él para que llene el vacío creado. El aire desplazado de tal forma entra en contacto con el proyectil y le empuja hacia adelante. Este proceso se repite continuamente a lo largo de una cierta

distancia […]. Pero creo que hay varias experiencias que muestran que tal método de proceder carece de todo valor […].

[Entre los varios ejemplos que da Buridan, se encuentra el de] una lanza cuya parte trasera tuviera una forma cónica tan afilada como su punta; una tal lanza, una vez arrojada, se desplazaría tan rápidamente como si su parte posterior no tuviera forma cónica. Pero, ciertamente, el aire que sigue a la lanza no puede presionar del modo indicado sobre una extremidad afilada, pues se vería fácilmente hendido por ésta [mientras que no tendría dificultad alguna en presionar sobre una lanza con el extremo posterior romo y empujarla así hacia adelante] […].

Así pues, podemos y debemos afirmar que en la piedra, o en cualquier otro proyectil, se halla impreso algo que constituye la fuerza motriz del proyectil en cuestión. Evidentemente, tal suposición es mucho mejor que caer de nuevo en la afirmación de que el aire quiere continuar moviendo el proyectil ya que lo cierto es que parece resistirse a ello […]. [El ente propulsor] imprime un cierto *impetus* o fuerza motriz al cuerpo en movimiento, impulso que actúa según la dirección en que ha sido lanzado el proyectil, ya sea hacia arriba o hacia abajo, lateral o circularmente. El *impetus* otorgado al cuerpo por parte del motor tiene un valor superior al necesario para imprimirle su actual velocidad, siendo precisamente tal *impetus* el que permite a la piedra continuar su movimiento una vez ha dejado de actuar el motor. No obstante, dicho *impetus* disminuye continuamente a causa de la resistencia presentada por el aire y de la gravedad de la piedra, que tira de ella en dirección contraria hacia la que se sentiría naturalmente predispuesto a mantenerla el *impetus*. Así pues, el movimiento de la piedra va haciéndose cada vez más lento, hasta que llega el momento en que el *impetus* disminuye o se corrompe de tal forma que la gravedad de la piedra se sale con la suya y la hace descender hasta su lugar natural.[4.11]

Ésta es sólo una parte de la elaborada discusión de Buridan, pudiéndose encontrar en las obras de sus sucesores un sinfín de tratamientos similares.

Hacia finales del siglo XIV, la dinámica del *impetus*, bajo una de las numerosas versiones comparables a la expuesta por Buridan, había reemplazado a la aristotélica en las obras de los principales científicos medievales. La tradición arraigó: se enseñaba en Padua aproximadamente en la época en que Copérnico frecuentó dicha universidad; Galileo la aprendió en Pisa de boca de su maestro Buonamico. Uno y otro, lo mismo que sus contemporáneos y sucesores, se sirvieron explícita o implícitamente de ella. La teoría del *impetus* desempeñó en diferentes ocasiones, y de muy diversas formas, un importante papel en la revolución copernicana.

Aunque no lo hayamos reconocido explícitamente, ya hemos visto un ejemplo de tal influencia. La refutación por parte de Nicolás de Oresme del argumento central de Aristóteles sobre la inmovilidad de la tierra da por supuesta la teoría del *impetus*, o algo muy semejante a la misma. Según la teoría aristotélica del movimiento, una piedra lanzada verticalmente hacia arriba debe moverse a lo largo de un radio terrestre fijo y perfectamente determinado. Si la tierra se mueve mientras la piedra está en el aire, ésta (o la flecha) no podrá acompañarla en su desplazamiento y caerá al suelo en un punto distinto al de partida. Pero si la tierra, al moverse hacia el este, imprime a la piedra un *impetus* en dicha dirección cuando aún está en contacto con quien la lanza, este *impetus* perdurará en el tiempo y será el responsable de que la piedra siga a la tierra en movimiento después de abandonarla. La teoría del *impetus* permite a la tierra en movimiento dotar de una propulsión interna a los cuerpos que la abandonan, propulsión que hace posible su seguimiento por parte de tales cuerpos. Lo mismo que su maestro Buridan, Nicolás de Oresme creía en la teoría del *impetus* y, si bien no la menciona explícitamente en su refutación de Aristóteles, no tiene sentido alguno su ataque a las tesis aristotélicas sin darla por supuesta. Sea como fuere, la teoría del *impetus* forma parte, tanto durante la Edad Media como en el Renacimiento, de la casi totalidad de argumentos en que se considera como posible el movimiento terrestre sin que éste deje tras sí los cuerpos lanzados desde la superficie de la tierra.

Algunos de los partidarios de la teoría del *impetus* la extendieron de inmediato a los cielos y, actuando de este modo, dieron un segundo gran

paso hacia el advenimiento del copernicanismo. El propio Buridan se expresa del siguiente modo en el pasaje de sus *Cuestiones* situado casi inmediatamente después del que acabamos de citar:

Puesto que la Biblia no afirma que inteligencias [angélicas] adecuadas muevan los cuerpos celestes, también podría decirse que no parece necesario en modo alguno introducir inteligencias de tal tipo. [Con igual bondad] podría responderse que Dios, al crear el mundo, asignó el movimiento que mejor le plugo a cada uno de los orbes celestes, y que al moverlos les imprimió un *impetus* para no tener que ocuparse más de ellos, excepto en cuanto a la influencia general por la que concurre como coagente de todo cuanto sucede. Así pues, llegado el séptimo día reposó de todo el trabajo que había ejecutado, confiando a otros las acciones y las pasiones. Y los *impetus* que imprimió a los cuerpos celestes no decrecieron ni se corrompieron con el paso del tiempo, pues no existe ninguna inclinación por parte de tales cuerpos a seguir otros movimientos distintos de los que Él les asignó, ni tampoco hay resistencia alguna que pudiera corromper o reprimir dichos *impetus*.[4.12]

En los escritos de Buridan, quizá por primera vez, se observa el intento de unir bajo un mismo conjunto de leyes al cielo y a la tierra, idea que será ampliada y profundizada por su alumno, Nicolás de Oresme. Éste sugería que “cuando Dios creó [los cielos] […], los dotó con una cierta cualidad y una cierta fuerza de movimiento de modo similar a como había dotado de peso a las cosas terrestres […]; es exactamente igual que un hombre que construye un reloj y que lo abandona a su propio movimiento. Así pues, Dios abandonó los cielos a su continuo movimiento […] según el orden [que Él había] establecido”.[4.13] Concebir el cielo como un mecanismo terrestre, como una pieza de relojería, equivale a hacer añicos la dicotomía absoluta entre las regiones sublunar y supralunar. Si bien los teóricos del *impetus* nunca llevaron más lejos la idea que acabamos de exponer, al menos durante la Edad Media, era precisamente dicha dicotomía, extraída

de Aristóteles y de la teología, la que debía ser rota en caso de que se pretendiera convertir a la tierra en un planeta.

La posibilidad de un movimiento de la tierra y la unificación parcial de las leyes terrestres y celestes constituyen las dos contribuciones más directas de la teoría del *impetus* a la revolución copernicana. No obstante, su más importante contribución a dicha revolución tuvo un carácter indirecto y volveremos brevemente sobre ella en el último capítulo. La teoría del *impetus*, a través del papel que desempeñó en la evolución de la dinámica newtoniana, contribuyó al advenimiento de un final venturoso para la revolución copernicana más de un siglo después de la muerte de Copérnico. Éste proporcionó una nueva descripción matemática del movimiento de los planetas, pero sólo eso, sin conseguir explicación alguna de tales movimientos. Inicialmente, su astronomía matemática carecía de todo significado desde el punto de vista físico, aspecto de la cuestión que planteó nuevos tipos de problemas a sus sucesores. Dichos problemas fueron finalmente resueltos por Newton, cuya dinámica proporcionó la pieza clave necesaria al sistema matemático de Copérnico. Así pues, la dinámica newtoniana contrajo una deuda todavía más grande que la astronomía de Copérnico con los precedentes análisis escolásticos sobre el movimiento.

La dinámica del *impetus* no es la dinámica newtoniana, aunque con su llamada de atención sobre nuevos problemas, nuevas variantes y nuevas abstracciones haya contribuido a preparar el camino de Newton. Con anterioridad a la teoría del *impetus*, Aristóteles y el experimento testificaban que sólo perdura el reposo. Buridan y algunos otros teóricos del *impetus* declaran que, a menos que encuentre alguna resistencia, también perdura el movimiento, con lo que daba un gran paso hacia lo que actualmente conocemos como la primera ley de Newton sobre el movimiento. Por otra parte, en un pasaje que hemos omitido en la citación descriptiva de páginas anteriores, Buridan iguala la cantidad de *impetus* de un cuerpo en movimiento con el producto de la velocidad del cuerpo por su cantidad de materia. El concepto de *impetus* se hace muy semejante, aunque no idéntico, al moderno concepto de cantidad de movimiento lineal, y en sus

escritos Galileo emplea a menudo los términos “*impetus*” y “cantidad de movimiento” de manera intercambiable. Como último ejemplo, valga indicar que Buridan casi llega a afirmar que la gravedad (o peso) de un cuerpo en caída libre imprime a dicho cuerpo idénticos incrementos de *impetus* (y por tanto de velocidad) en intervalos de tiempo iguales. Galileo no fue el primero de los sucesores de Buridan en proponer dicha relación ni en deducir de ella, con la ayuda de otros artificios analíticos suministrados por los escolásticos, la moderna relación cuantitativa entre el tiempo de caída y la distancia recorrida. Contribuciones como la que acabamos de indicar son una muestra del importante papel desempeñado por la ciencia escolástica en la evolución de la dinámica newtoniana, piedra angular de la estructura del nuevo universo creado por Copérnico y sus sucesores.

Durante el siglo XVII, precisamente en el momento en que quedaba demostrada por primera vez toda su utilidad, la ciencia escolástica se vio duramente atacada por quienes intentaban construir una línea de pensamiento radicalmente nueva. Los escolásticos se revelaron como presa fácil a todo tipo de críticas, imagen que perduró con el transcurso del tiempo. Los científicos de la Edad Media encontraron más a menudo sus problemas en los textos que en la naturaleza. En la actualidad, buen número de dichos problemas no parece merecer tal calificación. Desde un punto de vista moderno, la actividad científica de la Edad Media era increíblemente ineficaz. Sin embargo, ¿de qué otra forma hubiera podido renacer la ciencia en occidente? Los siglos durante los que imperó la escolástica son aquellos en que la tradición de la ciencia y la filosofía antiguas fue simultáneamente reconstruida, asimilada y puesta a prueba. A medida que iban siendo descubiertos sus puntos débiles éstos se convertían de inmediato en focos de las primeras investigaciones operativas en el mundo moderno. Todas las nuevas teorías científicas de los siglos XVI y XVII tienen su origen en los jirones del pensamiento de Aristóteles desgarrados por la crítica escolástica. La mayor parte de estas teorías contiene asimismo conceptos claves creados por la ciencia escolástica. Más importante aún que tales conceptos es la posición de espíritu que los científicos modernos han heredado de sus predecesores medievales: una fe ilimitada en el poder le la razón humana

para resolver los problemas de la naturaleza. Tal como ha remarcado Whitehead, “la fe, en las posibilidades de la ciencia, engendrada con anterioridad al desarrollo de la teoría científica moderna, es un derivado inconsciente de la teología medieval”.[4.14]

La astronomía en la época de Copérnico

Al discutir las modificaciones introducidas en la tradición aristotélico-ptolemaica a finales de la Edad Media apenas hemos dicho nada sobre el desarrollo de la astronomía planetaria. De hecho, tal desarrollo apenas existió en la Europa medieval, debido en parte a la dificultad intrínseca de los textos matemáticos y, en parte, a que el problema de los planetas se presentaba como una cuestión de carácter sumamente esotérico. El tratado *Del cielo* de Aristóteles describía la globalidad del universo en términos relativamente simples; el *Almagesto* de Ptolomeo, más elaborado, se ocupaba casi exclusivamente del cálculo matemático de las posiciones planetarias. En consecuencia, aunque tanto las obras de Aristóteles como las de Ptolomeo se tradujeron simultáneamente hacia finales del siglo XII, la elaborada astronomía ptolemaica tardó mucho más en ser asimilada que los trabajos aristotélicos sobre lógica, filosofía y cosmología. La metafísica del siglo XIII rivaliza en profundidad con la de Aristóteles. La física y la cosmología del siglo XIV superan a las aristotélicas en profundidad y coherencia lógica. Con todo, hasta mediados del siglo XV los europeos no produjeron una tradición astronómica autóctona capaz de rivalizar con la obra de Ptolomeo. El primer tratado europeo de astronomía que alcanzó amplia difusión, escrito hacia 1233 por Juan de Sacrobosco, copiaba servilmente un tratado árabe elemental y consagraba un solo capítulo al estudio de los planetas, en comparación con los nueve dedicados al tema por Ptolomeo. Durante los dos siglos siguientes sólo vieron la luz una serie de comentarios al libro de Sacrobosco y algunos textos de corte parecido, todos ellos sin demasiado éxito. Hasta dos décadas antes del nacimiento de

Copérnico, pocas fueron las manifestaciones concretas de un progreso técnico en el campo de la astronomía planetaria. Este progreso se hace patente en obras como las del alemán Georg Peuerbach (1423-1461) y las de su pupilo Johannes Müller (1436-1476), conocido por Regiomontano.

Así pues, para los europeos contemporáneos de Copérnico, la astronomía planetaria era un campo casi nuevo, que fue abordado en un clima intelectual y social muy distinto del que hasta entonces había enmarcado los estudios astronómicos. Dicha diferencia se debía parcialmente a las adherencias teológicas sobrevenidas a la tradición astronómica, aspectos que hemos examinado en las obras de Santo Tomás de Aquino y Dante. Cambios aún de mayor importancia derivaron de la crítica lógica y cosmológica de hombres como Jean Buridan y Nicolás de Oresme. Con todo, se trata de contribuciones medievales, es decir, de una época no conocida por Copérnico. La vida de Copérnico transcurrió entre 1473 y 1543, las décadas centrales del Renacimiento y la Reforma; los nuevos acontecimientos que caracterizan este período también desempeñaron un papel importante en la génesis y el desarrollo de su obra.

Los estereotipos se arrumban más fácilmente durante los períodos de fermentación general, y la agitación en la Europa renacentista y reformista facilitó la innovación astronómica de Copérnico. El cambio en un campo de actividades conlleva la disminución de la fuerza de los estereotipos en los restantes dominios. Una y otra vez se han producido radicales innovaciones científicas en períodos de convulsión nacional o internacional, y Copérnico vivió en una de tales épocas. Los musulmanes amenazaban de nuevo con absorber vastos territorios de una Europa presa de las rivalidades dinásticas por las que la nación-estado reemplazaba a la monarquía feudal. Una nueva aristocracia comercial, acompañada por rápidos cambios en las instituciones económicas y en la tecnología, comenzaba a rivalizar con las viejas aristocracias de la Iglesia y la nobleza terrateniente. Lutero y Calvino encabezaron las primeras revueltas victoriosas contra la hegemonía religiosa del catolicismo. En una época marcada por tan evidentes conmociones en la vida política, social y religiosa, una innovación en el

dominio de la astronomía planetaria quizá no apareciera como tal desde un primer momento.

Una serie de características específicas de esta época tuvo efectos mucho más concretos sobre la astronomía. Por ejemplo, el Renacimiento fue un período de viajes y exploraciones. Cincuenta años antes del nacimiento de Copérnico, los viajes de los portugueses a lo largo de las costas africanas habían comenzado a excitar la imaginación y la avaricia de los europeos. El primer desembarco de Colón en tierras de América (Copérnico tenía entonces diecinueve años) tan sólo fue el coronamiento de esta primera serie de exploraciones, creando sólidas bases para nuevos y numerosos viajes. El éxito de las exploraciones exigía una mejora en los mapas y las técnicas de navegación, aspectos que dependían parcialmente de un mejor conocimiento de los cielos. El príncipe Enrique el Navegante, organizador y director de los primeros viajes portugueses, hizo construir uno de los primeros observatorios de Europa. Las necesidades de la exploración contribuyeron a crear una demanda de astrónomos europeos competentes, con lo que, hasta cierto punto, cambió la actitud de éstos hacia su propia ciencia. Cada nuevo viaje revelaba nuevos territorios, nuevos productos y nuevos pueblos. Los hombres no tardaron en comprender hasta qué punto podían ser erróneas las antiguas descripciones de la tierra. En particular, se percataron de cuán equivocado podía estar Ptolomeo, pues, además del más grande astrónomo y astrólogo de la antigüedad, también había sido el geógrafo de mayor envergadura. El conocimiento por parte del astrónomo —conocimiento que pronto descubriremos en el propio Copérnico— de que el hombre renacentista podía por fin corregir la geografía de Ptolomeo, le preparó para el advenimiento de los cambios en su propio dominio.

Las discusiones en torno a las reformas de los calendarios tuvieron un efecto aún más directo y dramático en la práctica de la astronomía renacentista, pues el estudio de aquellos enfrentó a los astrónomos con la inadecuación e insuficiencia de las técnicas de computación que venían empleando. Los errores acumulativos del calendario juliano habían sido reconocidos mucho tiempo antes, y las propuestas para reformarlo se

remontaban a antes del siglo XIII. No obstante, tales proyectos no se pusieron en marcha de forma eficaz hasta el siglo XVI, cuando las crecientes dimensiones de las entidades políticas, económicas y administrativas dieron una renovada importancia a la necesidad de encontrar un medio eficaz y uniforme de computar las fechas. Dicha reforma se convirtió entonces en un proyecto oficial de la Iglesia, con resultados para la astronomía muy bien ilustrados por la propia biografía de Copérnico. A principios del siglo XVI se pidió a Copérnico que aconsejara al papado sobre la reforma del calendario. Copérnico declinó la oferta y propuso que fuera pospuesta la reforma, pues opinaba que las teorías y observaciones existentes aún no permitían establecer un calendario verdaderamente adecuado. Cuando Copérnico expone los aspectos de la astronomía de su tiempo que le habían llevado a reflexionar sobre su teoría fundamental, escribe: “En primer lugar, es tal su inseguridad [la de los matemáticos] acerca de los movimientos del sol y de la luna que no pueden deducir ni observar la duración exacta del año estacional” (véase más adelante, p. 149). La reforma del calendario, dice Copérnico, exige una reforma de la astronomía. El prefacio de su *De revolutionibus* concluye sugiriendo que su nueva teoría podría posibilitar la creación de un nuevo calendario. De hecho, el calendario gregoriano, adoptado por primera vez en 1582, se basaba sobre el establecimiento de cálculos fundados en Copérnico.

El reconocimiento de lo inadecuado de las técnicas existentes para el cálculo astronómico se vio acrecentado por otro aspecto de la vida renacentista. Durante el siglo XV Europa había conocido un segundo gran despertar intelectual mezclado con un segundo redescubrimiento de los maestros clásicos. Con todo, contrariamente a lo acaecido en el siglo XII, este segundo renacimiento del saber antiguo no fue fundamentalmente un resurgimiento de carácter científico. La mayor parte de los documentos redescubiertos ejemplificaban aspectos de la literatura, el arte y la arquitectura antiguas, materias cuya gran tradición era escasamente conocida en occidente, sobre todo porque la cultura islámica había mostrado cierta indiferencia ante las mismas. Sin embargo, los manuscritos

descubiertos en el siglo XV también incluían algunas importantes obras matemáticas del periodo helenístico y, hecho aún más importante, las versiones griegas originales de un gran numero de clásicos científicos que hasta entonces solo eran conocidos en lengua árabe. Como resultado de todo ello, la ineptitud del sistema ptolemaico para prever correctamente los movimientos celestes no podía ya ser imputada por más tiempo a los errores acumulados por las sucesivas transmisiones y traducciones. Los astrónomos ya no podían seguir creyendo que su ciencia decaía desde la muerte de Ptolomeo.

Por ejemplo, Peuerbach comenzó su carrera de astrónomo trabajando sobre traducciones de segunda mano del *Almagesto* y recogidas del Islam. A partir de tales traducciones consiguió reconstruir una exposición del sistema ptolemaico más adecuada y completa que cualquiera de las conocidas hasta aquel entonces. Sin embargo, este trabajo sólo sirvió para convencerle de que una astronomía verdaderamente adecuada no podía ser extraída de fuentes árabes. Los astrónomos, pensaba, deben trabajar a partir de los originales griegos, y estaba a punto de marcharse a Italia para examinar los manuscritos existentes allí cuando le sobrevino la muerte en 1461. Sus sucesores, en particular Johannes Müller, trabajaron sobre versiones griegas, con lo que descubrieron que incluso la formulación original de Ptolomeo era inadecuada. Los eruditos del siglo XV, al hacer accesibles textos ortodoxos de los autores antiguos, ayudaron a los inmediatos predecesores de Copérnico a reconocer que había llegado el momento de operar un cambio de rumbo.

Factores como los que acabamos de evocar en líneas precedentes pueden ayudarnos a comprender por qué la revolución copernicana acaeció precisamente cuando lo hizo. Todos ellos eran elementos esenciales que propiciaban un clima de renovación astronómica. Sin embargo, hay otros aspectos del Renacimiento, de carácter más intelectual, que desempeñaron su papel, aunque en cierta forma distinto, dentro de la revolución copernicana. Se trata de aspectos vinculados al humanismo —la corriente de pensamiento dominante en la época—, y su repercusión sobre la revolución copernicana se centra menos en el momento en que ocurrió que

en la forma tomada por ésta. El humanismo no era un movimiento básicamente científico. Muy a menudo los propios humanistas se habían opuesto encarnizadamente a Aristóteles, a los escolásticos y a toda la tradición del saber cultivado en las universidades. Sus fuentes eran los recientemente descubiertos clásicos literarios y, como los hombres de letras de otras épocas, muchos humanistas rechazaban en bloque la empresa científica. La actitud de Petrarca es típica al respecto y recuerda de forma extraña y significativa el desprecio hacia la ciencia manifestado por san Agustín. “Aunque todas estas cosas fueran verdaderas, no contribuirían en modo alguno a una vida feliz, pues ¿en qué nos ayuda familiarizarnos con la naturaleza de los animales, pájaros, peces y reptiles si seguimos ignorándolo todo respecto a la naturaleza de la especie humana, a la cual pertenecemos, y no sabemos, o no nos preocupamos por saber, de dónde venimos y hacia dónde vamos?”.[4.15] Si el humanismo hubiera sido la única corriente intelectual del Renacimiento, la revolución copernicana quizá se hubiera visto pospuesta por mucho tiempo. La obra de Copérnico y sus contemporáneos astrónomos pertenece de lleno a esta tradición universitaria tan ridiculizada por los humanistas.

No obstante, los humanistas no consiguieron bloquear el avance de la ciencia. Durante el Renacimiento, una tradición humanística, dominante fuera de las universidades, coexistió con una tradición científica cultivada en su interior. En consecuencia, la primera repercusión del antiaristotelismo dogmático de los humanistas sobre la ciencia fue facilitar a otros la ruptura con los conceptos básicos de la ciencia aristotélica. Un segundo efecto, aún más importante, fue la sorprendente fecundación de la ciencia por parte de la poderosa corriente de desapego de este mundo que caracterizaba al pensamiento humanista. De este aspecto del humanismo, del que la cita precedente de Petrarca nos da un buen ejemplo, parece ser que algunos científicos renacentistas como Copérnico, Galileo y Kepler extrajeron dos ideas indudablemente ajenas al pensamiento de Aristóteles: una nueva fe en la posibilidad y la importancia de descubrir en la naturaleza simples regularidades aritméticas y geométricas, y una nueva visión del sol como fuente de todos los principios y fuerzas vitales existentes en el universo.

El desapego de lo mundano del humanismo derivaba de una tradición filosófica bien definida sobre la que habían ejercido gran influencia san Agustín y otros de los primeros Padres de la Iglesia, aunque se hubiera visto temporalmente eclipsada a partir del siglo XII por el redescubrimiento de las obras de Aristóteles. Dicha tradición, a diferencia de la aristotélica, descubría la realidad, no en las cosas efímeras de la vida cotidiana, sino en un mundo espiritual exento de todo cambio. Platón, el punto del que arranca esta linea de pensamiento, parece a menudo rechazar los objetos de este mundo por ser meras sombras imperfectas de un universo eterno de ideas, cuyos objetos ideales o “formas” existen al margen del espacio y del tiempo. Sus sucesores, los llamados neoplatónicos, hicieron hincapié en esta tendencia del pensamiento del maestro en detrimento de todas las demás. Su filosofía mística, tomada como modelo por muchos humanistas, sólo reconocía una realidad trascendente. No obstante y a pesar de todo su misticismo, el pensamiento neoplatónico contenía una serie de elementos que imprimieron una dirección realmente nueva a la ciencia del Renacimiento.

El neoplatónico pasó de un salto desde el cambiante y corruptible mundo de la vida cotidiana al mundo eterno del espíritu puro, y las matemáticas le mostraron la forma de llevar a cabo su cabriola. Para él las matemáticas ejemplificaban lo eterno y lo real en medio de las apariencias imperfectas y cambiantes del mundo terrestre. Los triángulos y círculos de la geometría plana fueron los arquetipos de todas las formas platónicas. No existían en parte alguna —ninguna línea ni ningún punto materializados sobre el papel satisfacen los postulados de Euclides—, pero estaban dotados de ciertas propiedades eternas y necesarias que sólo el espíritu podía descubrir y que, una vez descubiertas, aparecían vagamente reflejadas en los objetos del mundo real. Los pitagóricos, que también veían el mundo real como una sombra del mundo eterno de las matemáticas, ejemplificaron el ideal de la ciencia terrestre con su descubrimiento de que cuerdas semejantes cuyas longitudes cumplen la relación numérica simple 1: 3/4: 2/3: 1/2 producen sonidos armónicos. La corriente matemática del

neoplatonismo se atribuye frecuentemente a Pitágoras, conociéndose bajo el nombre de neopitagorismo.

El propio Platón subrayaba la necesidad de las matemáticas como adiestramiento para el espíritu en búsqueda de formas. Se dice que sobre la puerta de su Academia había colocado la siguiente inscripción: "Que nadie traspase mis puertas sin conocer la geometría".[4.16] Los neoplatónicos fueron más lejos. Encontraron en las matemáticas la clave de la esencia divina, del alma humana y del alma del mundo que impregnaba el universo. Un pasaje típico de Proclo, neoplatónico del siglo V, expone a la perfección parte de esta visión mística de las matemáticas:

Por consiguiente, el alma [del mundo] en ningún caso puede ser comparada a una tablilla lisa, privada de todo argumento; antes bien, es una tabla siempre escrita, que inscribe sobre sí misma los caracteres de los que extrae una plenitud eterna del intelecto […]. Así pues, todas las especies matemáticas tienen una existencia primaria en el alma: antes que a los números sensibles, debe servir de base, en sus más recónditos huecos, a números que se mueven por sí mismos; a figuras vitales antes que a lo visible; a proporciones armónicas ideales antes que a los acordes; y a orbes invisibles antes que a los cuerpos que se mueven según círculos […]. Debemos considerar que tales entes ideales siempre sustentan vital e intelectualmente a números sensibles, figuras, razones y movimientos, a modo de arquetipos de los mismos. En este aspecto, debemos seguir la doctrina expuesta en el *Timeo*, que deriva el origen del alma y deduce su textura de las formas matemáticas, fundamentando en su naturaleza las causas de todo cuanto existe.[4.17]

Proclo y los humanistas que abrazaron su causa se hallan muy alejados de las ciencias físicas, aunque no por ello dejaron de influir parcialmente sobre sus contemporáneos con inclinación científica, con lo que un buen número de científicos de las postrimerías del Renacimiento iniciaron una nueva búsqueda de simples regularidades geométricas y aritméticas en el

seno de la naturaleza. Doménico María de Novara, amigo y profesor de Copérnico en Bolonia, mantuvo estrechas relaciones con los neoplatónicos florentinos que traducían a Proclo y a otros autores de su escuela. El propio Novara fue uno de los primeros en criticar sobre bases neoplatónicas la teoría ptolemaica de los planetas, guiado por el convencimiento de que ningún sistema tan complejo y embarazoso podía ser una buena representación del verdadero orden matemático de la naturaleza. Cuando Copérnico, discípulo de Novara, se lamenta de que los astrónomos ptolemaicos "parecen violar el primer principio concerniente a la uniformidad de los movimientos" y de que eran incapaces de "deducir el principal problema, es decir, la forma del mundo y la inmutable simetría de sus partes" (véase más adelante, p. 150), participa de la misma tradición neoplatónica. La corriente neoplatónica aparece aún con más fuerza en la obra de Kepler, el gran sucesor de Copérnico. Como veremos en páginas posteriores, la búsqueda de relaciones numéricas simples aparece *in extenso* en los trabajos de Kepler, motivando la mayor parte de sus investigaciones.

El origen de la vinculación entre el neoplatonismo y el culto al sol es bastante más oscuro, pero puede encontrarse en el pasaje de Proclo que acabamos de citar cierta indicación sobre el tipo de lazos que los unen. El pensamiento neoplatónico nunca ha podido prescindir por completo del mundo real. Las "figuras vitales" y los "orbes invisibles" que Proclo encontraba en el alma del mundo o en Dios podían constituir las entidades filosóficas primarias, las únicas cosas que gozaban de una realidad y una existencia completas. Con todo, el neoplatónico no podía dejar de conceder un cierto tipo de existencia a los cuerpos imperfectos detectados por los sentidos, estas copias de segundo orden engendradas por las "figuras vitales". Como dice Proclo, las formas matemáticas que determinan la naturaleza del alma del mundo también son "las causas de todo cuando existe". Tales formas engendran innumerables copias degradadas y materializadas a partir de su propia substancia puramente intelectual. El Dios del neoplatónico era un principio que procreaba y se desdoblaba, cuyo inmenso poder quedaba testimoniado por la propia multiplicidad de las formas que emanaban de Él. En el universo material, esta fecunda divinidad

se hallaba convenientemente representada por el sol, cuyas emanaciones visibles e invisibles proporcionaban luz, calor y fertilidad al universo.

Esta identificación simbólica del sol con Dios se observa con frecuencia en la literatura y el arte renacentistas. Marsilio Ficino, gran figura de la academia humanista y neoplatónica de la Florencia del siglo XV, le ha dado una expresión típica en su *Liber de sole*:

Nada revela más plenamente la naturaleza del Bien [que es Dios] que la luz [del sol]. En primer lugar, la luz es el más claro y brillante de los objetos sensibles. En segundo lugar, nada hay que se difunda con tanta facilidad, amplitud o rapidez como la luz. En tercer lugar, cormo si fuera una caricia, penetra todas las cosas sin dañarlas y con extrema dulzura. En cuarto lugar, el calor que le acompaña sostiene y alimenta a todas las cosas, y es el generador y el motor universales […]. El Bien se esparce a sí mismo por todo lugar, endulzando y seduciendo a todas las cosas. No actúa por obligación, sino por el amor que lo acompaña, como el calor [acompaña a la luz]. Este amor atrae de tal forma a todo objeto que acaban por abrazar libremente el Bien […]. Quizá la luz es el órgano que permite la visión del espíritu celestial, o el propio acto de la visión, operando a distancia, vinculando todas las cosas al cielo, aunque sin abandonarlo nunca y sin mezclarse con las cosas externas […]. Mirad simplemente al cielo, os lo ruego, ciudadanos de la patria celeste […]. El sol puede significar para vosotros el propio Dios, ¿y quién osaría decir que el sol es una simple ilusión?[4.18]

Con Ficino, lo mismo que con Proclo, nos encontramos muy alejados de la ciencia. Ficino no parece comprender la astronomía y, a decir verdad, jamás intentó reconstruirla. Aunque el sol adquiera una nueva significación en el universo ficiniano, sigue manteniendo su antigua posición. No obstante, esta posición había dejado de ser correcta. Por ejemplo, Ficino afirma que el primer ente creado fue el sol, y que su posición fue la del centro de los cielos. Ciertamente, ninguna posición inferior, en el espacio o

en el tiempo, podría ser compatible con la dignidad del sol ni con su función creadora. No obstante, la susodicha ubicación no era compatible con el sistema astronómico de Ptolomeo, y las dificultades planteadas al neoplatonismo por tal desacuerdo quizá ayudaran a Copérnico en su concepto de un nuevo sistema edificado alrededor de un sol central. Sea como fuere, dichas dificultades le proporcionaron un argumento en favor de su nuevo sistema. Inmediatamente después de haber discutido la nueva posición ocupada por el sol, Copérnico alude a la idoneidad de su nueva cosmología (véase más adelante, pp. 186-188). Las autoridades que recaba en su favor son abiertamente neoplatónicas:

En medio de todos se asienta el sol. En efecto, ¿quién en este espléndido templo colocaría en mejor punto del que ocupa, desde donde puede iluminarlo todo a un mismo tiempo, a esta luminaria? En verdad, con razón algunos le han llamado la pupila del mundo, otros el Espíritu [del mundo], otros, por fin, su Rector. Trismegisto le llama el Dios visible; la Electra de Sófocles, el omnividente. De este modo, el sol, como reposando sobre un trono real, gobierna la familia de los astros que le circundan.

Es pues manifiesto el neoplatonismo que preside la actitud de Copérnico frente al sol y a la simplicidad matemática. Se trata de un elemento esencial en el clima intelectual que alumbró su visión del universo. Sin embargo, no es fácil discernir si en el pensamiento de Copérnico una actitud neoplatónica dada es posterior o anterior a la elaboración de su nueva astronomía. No existe una ambigüedad similar en los copernicanos posteriores. Por ejemplo, Kepler, el hombre que hizo funcionar el sistema copernicano, es sumamente explícito en cuanto a las razones que le impulsan a preferir la propuesta de Copérnico, y entre éstas expone la siguiente:

[El sol] es una fuente de luz, rico en calor fecundo, sumamente hermoso, límpido y puro a la vista, el manantial de la visión, pintor de todos

los colores, aunque en sí mismo carezca por completo de ellos, llamado el rey de los planetas por su movimiento, corazón del mundo por su poder, su ojo por su belleza, y el único a quien deberíamos juzgar digno del Más Alto Dios si se encontrara a gusto en un domicilio material y escogiera como residencia un lugar en el que permanecer en compañía de los ángeles benditos […]. Pues si los alemanes eligen como César al más poderoso de todo el imperio, ¿quién vacilará en asignar los votos de los movimientos celestes al que ya administra todos los demás movimientos y cambios con el concurso de la luz, que sólo a él le pertenece? […]. [Así pues], volvemos al sol que, en virtud de su dignidad y poder, es el único ser al que parece convenir el papel de digna morada del propio Dios, por no hablar del primer motor.[4.19]

Hasta algunos años después de la muerte de Copérnico, la magia matemática y el culto al sol, que de forma tan nítida se nos aparecen en las investigaciones de Kepler, persistieron como los principales puntos de contacto explícito entre el neoplatonismo renacentista y la nueva astronomía. No obstante, a finales del siglo XVI, un tercer aspecto del pensamiento neoplatónico se fusionó con el copernicanismo, contribuyendo a remodelar la estructura del universo de Copérnico. A diferencia de la divinidad adorada por los neoplatónicos, cuya inmensa fecundidad daba la medida exacta de su perfección, el Dios de santo Tomás de Aquino y de Aristóteles había sido concebido como un arquitecto que manifestaba su perfección a través de la precisión y el orden impresos en su creación. El Dios de santo Tomás de Aquino se acomodaba perfectamente al cosmos finito de Aristóteles, pero no era tan fácil enmarcar dentro de límites precisos a la Deidad de los neoplatónicos. Si la perfección de Dios se mide por la extensión y multiplicidad de su procreación, cuanto más vasto y poblado sea un universo más perfecta será la divinidad que lo haya creado. Así pues, para muchos neoplatónicos la finitud del universo de Aristóteles era incompatible con la perfección divina. Su infinita bondad, pensaban, sólo podía quedar satisfecha mediante un acto infinito de creación. Con

anterioridad a Copérnico, la visión que resultaba de una pluralidad de mundos habitados en el seno de un universo infinito en extensión ya había sido fuente de importantes divergencias con respecto a la doctrina aristotélica. Durante el Renacimiento, la importancia nuevamente otorgada a la infinita creatividad de Dios quizás haya sido un elemento significativo en el clima de opinión que engendró la innovación de Copérnico. Sobre lo que no hay duda alguna, tal como veremos más adelante, es el importantísimo papel que jugó dicha idea en la transición post-renacentista del universo finito de Copérnico al espacio infinito de la máquina del mundo newtoniana.

El neoplatonismo completa la escenificación, a nivel conceptual, que acoge el desarrollo de la revolución copernicana, al menos tal y como lo examinaremos en el presente trabajo. Se trata de una confusa y desconcertante escenificación para una revolución astronómica, pues son muy escasos los elementos propiamente astronómicos que intervienen. Con todo, la ausencia de éstos es precisamente lo que da importancia a la escenificación. No es en modo alguno necesario que las innovaciones en una ciencia surjan como respuestas a nuevos hechos planteados en su seno. Copérnico no se persuadió de la inadecuación de la astronomía antigua o de la necesidad de un cambio en la misma a través de un descubrimiento astronómico fundamental o una nueva posibilidad de observación astronómica. Aún medio siglo después de su muerte, los datos de que disponían los astrónomos no encerraban nada que pudiera presagiar cambios potencialmente revolucionarios. Es, pues, en el medio ambiente intelectual tomado en su sentido más amplio, fuera del estricto marco de la astronomía, donde cabe buscar principalmente los hechos que permiten comprender por qué la revolución tuvo lugar en determinado momento y qué factores la precipitaron. Como indicábamos a comienzos del presente capítulo, Copérnico inició sus investigaciones astronómicas y cosmológicas muy cerca de donde se detuvieron Aristóteles y Ptolomeo. En este sentido es el heredero directo de la tradición científica de la antigüedad. Pero recibía esta herencia después de transcurridos casi dos milenios. En el ínterin, el propio proceso de redescubrimiento de la misma, la integración

medieval de la ciencia y la teología, los siglos de crítica escolástica y las nuevas corrientes de pensamiento y formas sociales surgidas en el Renacimiento se combinaron para cambiar la actitud de los hombres de su época frente a la herencia científica que aprendían en las universidades. Veremos en el próximo capítulo, al exponer la innovación introducida por Copérnico, cuan grande pudo ser este cambio esencial y, también, cuan extrañamente pequeño fue.

Capítulo 5
LA INNOVACIÓN DE COPÉRNICO

COPÉRNICO Y SU REVOLUCIÓN

La publicación en 1543 del *De revolutionibus orbium caelestium* de Copérnico inaugura el profundo cambio dentro del pensamiento astronómico y cosmológico que denominamos revolución copernicana. Hasta aquí nos hemos ocupado exclusivamente de los antecedentes de dicha revolución a fin de asentar el escenario que la vio nacer. Pasaremos ahora a abordar la revolución propiamente dicha, iniciando nuestro análisis con el estudio, a lo largo del presente capítulo, de la contribución de Copérnico a esta revolución. Hasta donde sea posible intentaremos descubrir su aportación en el propio *De revolutionibus* copernicano, el libro que presentó al mundo la nueva astronomía. Nos enfrentaremos con una serie de dificultades e incongruencias desde el primer momento, y la resolución de las mismas dependerá de nuestra comprensión de la revolución copernicana en su conjunto o, siendo ésta típica en muchos de sus aspectos, de la de cualquier otra conmoción conceptual de primera magnitud en el ámbito del conocimiento científico.

El *De revolutionibus* es para nosotros un texto problemático, en parte por las dificultades intrínsecas que plantea el tema abordado en dicho texto. Dejando aparte el libro primero, que es una introducción al problema, el resto de la obra es demasiado matemática para que pueda ser leída y comprendida por quienes no sean expertos astrónomos. Expondremos las aportaciones técnicas esenciales que encierra por medio de una paráfrasis

relativamente poco matematizada, actuando de forma muy similar a la que hemos escogido para presentar el contenido del *Almagesto*, y, al actuar de este modo, dejaremos de lado ciertos problemas esenciales que planteaba el *De revolutionibus* a sus lectores del siglo XVI. Si Copérnico hubiera expuesto su nueva astronomía en la forma simplificada que adoptaremos a menudo a lo largo del presente capítulo, quizá la acogida de la misma hubiera sido muy diferente. Por ejemplo, de tratarse de una obra más inteligible, no hubiera tardado tanto tiempo en organizarse un movimiento de oposición en su contra. Así pues, el primer problema que se nos plantea es superar la barrera que una falta de conocimientos técnicos levanta entre nosotros y los libros principales de la obra que inaugura la revolución copernicana.

Sin embargo, aunque sea necesario reconocerla desde el primer momento, la oscuridad técnica del *De revolutionibus* no constituye ni el más difícil ni el más importante de los problemas inherentes a la obra de Copérnico. Las principales dificultades del *De revolutionibus* —dificultades a las que no podemos sustraernos— provienen parcialmente de la aparente incompatibilidad entre dicho texto y su función en el desarrollo de la astronomía. Por sus consecuencias, el *De revolutionibus* es, sin duda alguna, una obra revolucionaria de la que se derivan un enfoque fundamentalmente nuevo de la astronomía planetaria, la primera solución simple y precisa al problema de los planetas y, con la adición de algunos nuevos elementos al modelo propuesto, una nueva cosmología. No obstante, para todo lector al tanto de los objetivos perseguidos, el *De revolutionibus* propiamente dicho debe mostrarse como un rompecabezas y una paradoja constantes pues, si tomamos como punto de referencia sus consecuencias, no podemos por menos que considerarlo como una obra árida, sobria y en modo alguno revolucionaria. La mayor parte de los elementos esenciales que asociamos a la revolución copernicana, a saber, los cálculos fáciles y precisos de las posiciones planetarias, la abolición de los epiciclos y de las excéntricas, la desaparición de las esferas, la idea de un sol semejante a las estrellas y la de un universo infinito en extensión, así como muchas otras, no aparecen por parte alguna en la obra de Copérnico.

Excepto en lo que se refiere al movimiento terrestre, el *De revolutionibus* parece desde todos los puntos de vista más estrechamente vinculado a las obras de astrónomos y cosmólogos de la antigüedad y de la Edad Media que a las de generaciones posteriores. Fueron estas últimas las que, basándose en los trabajos de Copérnico, pusieron de manifiesto las radicales consecuencias que derivaban del texto copernicano.

Así pues, la importancia del *De revolutionibus* está menos en lo que dice por sí mismo que en lo que ha hecho decir a otros. El libro dio nacimiento a una revolución que él apenas había esbozado, por lo que es lícito hablar de un texto provocador de revolución antes que de un texto revolucionario propiamente dicho. Tal tipo de textos constituyen un fenómeno relativamente frecuente y en extremo significativo dentro del desarrollo del pensamiento científico. Pueden ser descritos como textos diversionarios de la dirección en la que progresaba el pensamiento científico. Una obra que engendra una revolución es, a un mismo tiempo, el momento culminante de una tradición pretérita y la fuente de una nueva tradición. Considerado globalmente, el *De revolutionibus* se sitúa casi por completo en la tradición astronómica y cosmológica de la antigüedad; con todo, dentro de su marco de referencia por lo general clásico, pueden encontrarse algunas novedades que desplazaron la orientación del pensamiento científico hacia caminos no previstos por su autor y que provocaron una rápida y completa ruptura con la tradición antigua. Considerado desde la visión retrospectiva que nos proporciona un conocimiento de la historia de la astronomía, el *De revolutionibus* goza de una doble naturaleza; es antiguo y moderno a un mismo tiempo, conservador y radical. En consecuencia, sólo puede descubrirse su significado considerando simultáneamente su pasado y su futuro, la tradición de la que deriva y la que engendrará.

Este doble enfoque de una misma obra será el principal problema que examinaremos a lo largo del presente capítulo. ¿Cuál es la relación de Copérnico con la tradición astronómica antigua en la que fue educado? O mejor dicho, ¿cuáles son los aspectos de esta tradición que le llevaron a creer que era esencial introducir alguna innovación astronómica, que era

necesario rechazar ciertos aspectos de la cosmología y la astronomía antiguas? Una vez que Copérnico resolvió romper con la tradición antigua, ¿hasta qué punto se hallaba necesariamente vinculado a ella en tanto que única fuente del instrumental teórico y observacional necesario para la práctica de la astronomía? ¿Cuál es la relación existente entre Copérnico y la tradición de la astronomía planetaria y la cosmología modernas? Teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por la formación y el instrumental característicos de la astronomía clásica, ¿qué innovaciones creadoras podía contener su obra? ¿De qué modo tales innovaciones, que acabaron por engendrar una astronomía y una cosmología radicalmente nuevas, pudieron verse inicialmente insertas en un contexto esencialmente clásico? ¿Cómo reconocieron y adoptaron sus sucesores los descubrimientos de Copérnico? Los problemas precedentes y sus corolarios son sintomáticos de las dificultades reales que plantea el *De revolutionibus* o cualquier otra obra científica que, a pesar de haber nacido en el seno de una determinada tradición de pensamiento científico, es el manantial de una nueva tradición que acaba por destruir a su progenitora.

RAZONES EN FAVOR DE UNA INNOVACIÓN. EL PREFACIO DE COPÉRNICO

Copérnico pertenece a este pequeño grupo de europeos que dieron nueva vida a toda la tradición helenística de la astronomía matemática y técnica que, en la antigüedad, había alcanzado su punto álgido en la obra de Ptolomeo. El *De revolutionibus* fue escrito tomando como modelo el *Almagesto*, y estaba casi exclusivamente destinado a este pequeño grupo de astrónomos contemporáneos de Copérnico pertrechados con los conocimientos técnicos necesarios para leer el tratado de Ptolomeo. Con Copérnico volvemos por primera vez sobre este tipo de problema astronómico de orden técnico que abordábamos en el capítulo 3 al estudiar el sistema ptolemaico desarrollado. De hecho, nos enfrentamos de nuevo con idéntico problema. El *De revolutionibus* fue escrito con el objeto de

resolver el problema de los planetas que Copérnico opinaba que ni Ptolomeo ni sus sucesores habían sabido solucionar. En la obra de Copérnico, el concepto revolucionario de una tierra en movimiento es, en principio, una consecuencia anómala de la tentativa llevada a cabo por un diestro y leal astrónomo celoso de reformar las técnicas empleadas en el cálculo de las posiciones de los planetas. Ésta es la primera incongruencia significativa del *De revolutionibus*: la desproporción entre el objetivo que motivó la innovación de Copérnico y la innovación propiamente dicha. Puede constatarse este hecho casi en las primeras líneas de la carta-prefacio que Copérnico antepuso al *De revolutionibus* con el fin de bosquejar la motivación, el origen y la naturaleza de su obra científica.[5.1]

AL SANTÍSIMO PADRE, PAPA PABLO III

Prefacio de Nicolás Copérnico a los Libros de las Revoluciones

Me doy perfecta cuenta, Santísimo Padre, de que ciertas personas, desde el momento en que conozcan que en estos libros sobre las revoluciones de las esferas del mundo atribuyo ciertos movimientos a la tierra, clamarán pidiendo una rápida condena, tanto de mi persona como de mis opiniones. Ahora bien, no estoy tan satisfecho con mi propio trabajo como para dejar de lado los juicios de los demás, y si bien no ignoro que los pensamientos del filósofo están lejos de hallarse bajo el control del juicio del vulgo, pues la tarea de aquél es buscar la verdad en todas las cosas en la medida en que Dios se lo permite, a la razón humana, no por ello dejo de considerar que debe huirse de las opiniones abiertamente contrarias a la recta razón. Por tal motivo, cuando pensaba cuán absurda considerarían mi interpretación de que la tierra se mueve aquellos que saben que el juicio de los siglos confirma la opinión de una tierra inmóvil situada en el centro del universo, me preguntaba una y otra vez si debía exponer por escrito mis comentarios para demostrar su movimiento o, por el contrario, si no era mejor seguir el ejemplo de los pitagóricos y algunos otros que, tal como nos lo testimonia la carta de Lisias a Hiparco, solían transmitir los misterios de la filosofía sólo a sus amigos y allegados y no por escrito, sino de viva voz. [Esta carta,

que Copérnico pensó por un momento incluir en el *De revolutionibus*, describe los preceptos pitagóricos y neoplatónicos de no revelar los secretos de la naturaleza a quienes no están iniciados en un culto místico. La referencia a dicha carta pone de manifiesto la participación de Copérnico en la restauración del neoplatonismo durante el Renacimiento, tema que ya se ha discutido en el capítulo precedente.] Según mi opinión, no actuaban así, tal como algunos piensan, por cierto recelo a divulgar sus doctrinas, sino con el fin de que cosas tan nobles, conocimientos conquistados con tan inmenso esfuerzo por los grandes hombres, no fueran menospreciados por aquellos a quienes repugna consagrar un arduo y serio trabajo al estudio porque consideran que no reporta beneficio inmediato alguno, ni por quienes, si bien se sienten empujados a abrazar el estudio liberal de la filosofía guiados por las exhortaciones y ejemplos de otros y a causa del embotamiento de su espíritu se encuentran entre los filósofos como zánganos entre abejas. Así pues, reflexionando sobre tales asuntos, poco faltó para que, por temor al desprecio que podía originar la novedad y absurdidad de mi teoría, decidiera abandonar por completo mi proyecto.

Sin embargo, mis amigos disuadieron al fin los prolongados titubeos y resistencias […] [uno de ellos] me había exhortado con frecuencia, e incluso me había reprochado gran número de veces el no haberlo hecho aún, a editar este libro y a mostrar a la luz del día cuanto llevaba ocultando, no sólo desde hacía nueve años, sino durante cuatro períodos de nueve años.

Esto mismo me pidieron también otras muchas personas […] exhortándome para que dejara a un lado mis temores y permitiera por fin la publicación de mi obra para mayor provecho de todos cuantos se ocupan en el estudio de las matemáticas. Y quizá, por absurda que pueda parecer hoy a la mayoría mi teoría sobre el movimiento de la tierra, tan sólo provoque admiración y reconocimiento cuando al publicarse mis comentarios vean cómo las más claras demostraciones disipan por completo las nubes de la paradoja. En base a tales argumentos y movido por semejantes esperanzas, he terminado por permitir a mis amigos que publiquen el trabajo que desde tanto tiempo atrás venían reclamándome.

Tal vez Vuestra Santidad se halle tan sorprendida de que me atreva a hacer públicas mis meditaciones —aunque a decir verdad, después de tan larga elaboración no tengo temor alguno en confiar a la imprenta mis ideas sobre el movimiento de la tierra [algunos años antes de publicar el *De revolutionibus*, Copérnico hizo circular entre sus amigos un breve manuscrito, conocido bajo el nombre de *Commentariolus*, en el que se exponía una primera versión de su astronomía centrada en el sol. Una segunda elaboración, anterior a la obra maestra de Copérnico, es la *Narrado prima* redactada por su discípulo Retico y publicada en 1540, reeditándose en 1541]—, como deseosa de saber en qué forma me vino al pensamiento la idea de osar imaginar, contrariamente a la opinión recibida de los matemáticos y casi en contra del buen sentido, un cierto movimiento terrestre. Por consiguiente, no quiero ocultar a Vuestra Santidad que lo único que me impulsó a buscar otra forma distinta de deducir los movimientos de las esferas fue el hecho de percatarme de que no existe acuerdo entre las investigaciones de los diferentes matemáticos.

En primer lugar, es tal su inseguridad acerca de los movimientos del sol y de la luna que no pueden deducir ni observar la duración exacta del año estacional. En segundo lugar, al establecer tales movimientos, así como los de los otros cinco astros errantes, no emplean ni los mismos principios ni las mismas demostraciones para explicar sus respectivas revoluciones y movimientos aparentes. Unos se valen exclusivamente de esferas homocéntricas [el sistema aristotélico, derivado por Aristóteles de las obras de Eudoxo y Calipo, y revitalizado en Europa poco antes de la muerte de Copérnico por los astrónomos italianos Fracastoro y Amici], otros de excéntricas y epiciclos. Sin embargo, ni unos ni otros alcanzan de forma completa con sus respectivos medios los fines que se proponen. En efecto, los que se acogen a las esferas homocéntricas, aunque hayan demostrado poder componer con su ayuda varios y diversos movimientos, no han conseguido establecer un sistema que explique completamente los fenómenos. En cuanto a aquellos que imaginaron la existencia de las excéntricas, si bien parece que con su ayuda han podido deducir en gran parte y calcular con exactitud los movimientos aparentes, se han visto en la

necesidad de admitir para ello muchas cosas [como la utilización del ecuante] que parecen violar el primer principio concerniente a la uniformidad de los movimientos. Finalmente, en lo que respecta al problema principal; es decir, la forma del mundo y la inmutable simetría de sus partes, no han podido ni encontrarla ni deducirla. Su obra puede ser comparada a la de un artista que, tomando de diversos lugares manos, pies, cabeza y demás miembros humanos —muy hermosos en sí mismos, pero no formados en función de un sólo cuerpo y, por lo tanto, sin correspondencia alguna entre ellos—, los reuniera para formar algo más parecido a un monstruo que a un hombre. Así pues, en el proceso de exposición que los matemáticos reclaman como propio se encuentran que han omitido algún elemento necesario o que han admitido algún elemento extraño y en modo alguno perteneciente a la realidad. Todo ello se hubiera evitado siguiendo unos principios prefijados, pues en el supuesto de que las hipótesis admitidas no fueran falaces, todo cuanto pudiera inferirse de ellas podría ser verificado sin lugar a dudas. Si cuanto acabo de exponer ha quedado oscuro, quizá se aclare de forma conveniente más adelante.

Una evaluación honesta de la astronomía contemporánea, dice Copérnico, muestra que no hay esperanza alguna de solución para el problema de los planetas si éste se aborda bajo el supuesto de un universo centrado en la tierra. Las técnicas tradicionales de la astronomía ptolemaica no han resuelto ni resolverán este problema; en su lugar, lo que han hecho es dar a luz un monstruo; debe existir, concluye, algún error fundamental en los conceptos básicos de la astronomía planetaria tradicional. Por primera vez un astrónomo técnicamente competente había rechazado la tradición científica consagrada por razones intrínsecas a su campo de estudio, y este reconocimiento profesional de un error técnico inauguraba la revolución copernicana. Esta necesidad sentida se encontraba en la raíz del descubrimiento de Copérnico, pero el sentimiento de necesidad era de un tipo completamente nuevo. Nunca en épocas anteriores la tradición astronómica se había presentado como monstruosa. Acababa de producirse

una metamorfosis, y el prefacio de Copérnico describe con gran brillantez las causas primarias de dicha transformación.

Copérnico y sus contemporáneos no sólo heredaron el *Almagesto*, sino también las teorías astronómicas de numerosos astrónomos árabes y algunos europeos que habían criticado y modificado el sistema ptolemaico. A ellos hace referencia Copérnico cuando habla de “los matemáticos”. Uno había añadido o suprimido algunos pequeños círculos; otro había empleado un epiciclo para explicar una irregularidad planetaria que Ptolomeo había tratado originalmente con una excéntrica; otros habían ideado un método, desconocido para Ptolomeo, con el que dar cuenta de pequeñas desviaciones detectadas respecto al movimiento previsto por un sistema epiciclo-deferente; otros, aun, gracias a nuevas mediciones, habían alterado los valores de las velocidades de rotación de los círculos del sistema ptolemaico. Ya no existía un sólo sistema ptolemaico, sino una docena o más de ellos, y su número se multiplicaba con inusitada rapidez al ir en aumento el número de astrónomos técnicamente cualificados. Todos estos sistemas se basaban sobre el modelo expuesto en el *Almagesto*; por consiguiente, eran sistemas “ptolemaicos”. Sin embargo, debido a la gran variedad de sistemas surgidos, el adjetivo “ptolemaico” había perdido buena parte de su significado propio. La tradición astronómica alcanzaba un notable grado de confusionismo; en sus textos no llegaban a especificarse de forma completa y precisa las técnicas que podía utilizar el astrónomo para calcular la posición de los planetas y, por consiguiente, no podía preverse con cierta precisión qué resultados obtendría a partir de sus cálculos. Equívocos de tal especie privaron a la tradición astronómica de su principal fuente de fuerza interna.

El monstruo denunciado por Copérnico presenta otras varias caras. Ninguno de los sistemas “ptolemaicos” conocidos por Copérnico daba resultados que coincidieran con observaciones cuidadosas efectuadas a simple vista. No es que tales resultados fueran peores que los obtenidos por Ptolomeo, pero tampoco los habían mejorado en lo más mínimo. Después de trece siglos de investigaciones infructuosas, un astrónomo inquieto podía muy bien preguntarse, opción por otro lado vedada a Ptolomeo, si otras

tentativas situadas en el marco de la misma tradición no tendrían mejores posibilidades de éxito. Además, en el tiempo que separaba las vidas de Ptolomeo y Copérnico habían aumentado considerablemente los márgenes de error acarreados por el enfoque tradicional, apareciendo así una causa suplementaria de insatisfacción. Los movimientos de un sistema de epiciclos y deferentes guardan una notable semejanza con los de las agujas de un reloj, cuyo error aparente, adelanto o retraso, se incrementa con el paso del tiempo. Así por ejemplo, si un reloj se retrasa en un segundo cada década, es muy posible que tal irregularidad no se haga palmaria al cabo de un año, ni incluso una vez transcurrida la década. Sin embargo, su mal funcionamiento difícilmente podrá escapar a la observación una vez transcurrido un milenio, pues el retraso alcanzado será ya del orden de los 2 minutos. Copérnico y sus contemporáneos disponían de datos astronómicos acumulados a lo largo de trece siglos, período mucho mayor que el cubierto por las observaciones del propio Ptolomeo, con lo que gozaban de la posibilidad de someter sus sistemas a una verificación mucho más sensible. En otras palabras, por fuerza debían percatarse mucho mejor de los errores inherentes al antiguo enfoque astronómico.

El paso del tiempo enfrentó al astrónomo del siglo XVI con un falso problema que, irónicamente, iba a tener mayor repercusión que el del movimiento de los planetas en cuanto al reconocimiento de los errores inherentes al método ptolemaico. Buen número de los datos de observación heredados por Copérnico y sus colegas eran absolutamente inservibles, pues colocaban a planetas y estrellas en posiciones que jamás habían ocupado. Algunos de estos datos habían sido recogidos y agrupados por malos observadores; otros se basaban en buenas observaciones, pero habían sido copiados o interpretados de forma equivocada a lo largo del proceso de transmisión de los mismos. Ningún sistema planetario simple —el de Ptolomeo, el de Copérnico, el de Kepler o el de Newton— era capaz de enmarcar todo el conjunto de datos observacionales que según los astrónomos renacentistas precisaban de una explicación. El problema de los datos de observación acumulados a lo largo del Renacimiento superaba en complejidad al problema cosmológico propiamente dicho. El mismo

Copérnico fue víctima de los datos que en un principio le habían ayudado a rechazar el sistema ptolemaico. No hay duda alguna de que su propio sistema hubiera dado mucho mejores resultados de mostrarse tan escéptico con las observaciones de sus predecesores como lo fue con sus sistemas matemáticos.

La confusión y la imprecisión constantes eran las dos principales características del monstruo descrito por Copérnico y, en la medida en que la revolución copernicana dependía de cambios explícitos dentro de la propia tradición astronómica, constituían sus principales fuentes. Sin embargo, no son las únicas. Podemos también preguntarnos qué razones situaban a Copérnico en posición de reconocer al monstruo. Ciertas metamorfosis aparentes de la tradición debieron aparecer ante sus ojos de forma relativamente simple puesto que en su época el aspecto del edificio astronómico clásico ya se hallaba suficientemente enmarañado y difuso. De hecho, ya hemos considerado esta faceta de la cuestión. Por otro lado, que Copérnico adquiriera plena conciencia de la monstruosidad dependía en gran medida de su adhesión a la amplia corriente de opinión filosófica y científica cuya génesis y naturaleza han sido descritas en el capítulo precedente. A partir del estado general de la astronomía de la época, una persona que no hubiera tenido las inclinaciones neoplatónicas de Copérnico quizá se hubiera limitado a concluir que el problema de los planetas no podía tener una solución al mismo tiempo simple y precisa. Además, un astrónomo no familiarizado con la tradición de la crítica escolástica es muy probable que hubiera sido incapaz de desarrollar críticas paralelas en su propio campo de estudio. Éstas y algunas otras novedades abordadas en el capítulo precedente constituyen las principales corrientes de pensamiento de la época de Copérnico. Aunque no parezca darse cuenta de ello, Copérnico se vio arrastrado por estas corrientes filosóficas del mismo modo en que sus contemporáneos lo fueron, aun sin saberlo, por el movimiento de la tierra. La obra de Copérnico permanece incomprensible a menos que se contemple en su relación tanto con el estado interno de la astronomía como con el más amplio clima intelectual de la época. Es la asociación de ambos quien da génesis al monstruo.

Sin embargo, la desazón engendrada por un monstruo ya reconocido no era más que el primer paso hacia la revolución copernicana. Siguió una investigación cuyos inicios se describen en la carta-prefacio de Copérnico:

Después de haber reflexionado largamente sobre la incertidumbre de las explicaciones dadas por los matemáticos a la composición de los movimientos de las esferas del mundo, comencé a constatar con enojo que los filósofos, a pesar del cuidado con que han estudiado los más mínimos extremos concernientes a sus círculos, no tenían ninguna teoría convincente sobre los movimientos de la máquina del Universo, construido para nosotros por el mejor y más perfecto de los artistas. [Nótese que Copérnico asimila "perfecto" con "matemáticamente puro". Todo buen aristotélico se hubiera opuesto con vehemencia a este enfoque neoplatónico, pues para él existen otros tipos de perfección.]

En consecuencia, me he tomado la molestia de leer las obras de todos los filósofos que han llegado a mis manos para ver si alguno de ellos había supuesto jamás que los movimientos de las esferas del mundo eran otros que los admitidos y enseñados por las actuales escuelas matemáticas. Primero encontré en Cicerón que Hicetas [de Siracusa, siglo V antes de nuestra era] pensaba que la tierra se mueve. Posteriormente, también vi como Plutarco reseñaba en sus obras que algunos otros filósofos han mantenido idéntica opinión. Para patentizarlo, transcribo las propias palabras de Plutarco:

"Sin embargo, otros creían que la tierra gozaba de movimiento. Así, Filolao el pitagórico [siglo IV antes de nuestra era] dice que se mueve alrededor del fuego [central] siguiendo un círculo oblicuo, lo mismo que el sol y la luna. Heráclides del Ponto y Ecfanto el pitagórico [siglo IV antes de nuestra era también asignan movimiento, aunque ciertamente no de traslación, a la tierra, considerando que gira alrededor de su propio centro como si fuera una rueda con un eje orientado de este a oeste".

Beneficiándome de estas opiniones comencé yo también a pensar en la movilidad de la tierra. Y, aunque la opinión parecía absurda, al saber que

otros antes de mí habían gozado de toda libertad para imaginar cualquier círculo a fin de explicar los fenómenos de los astros, consideré que en justa correspondencia podía permitírseme la experiencia de investigar si, admitiendo algún movimiento de la tierra, era posible encontrar una teoría de los orbes celestes más sólida que las emitidas por aquellos.

Dando por supuestos los movimientos que atribuyo a la tierra en el presente trabajo, descubrí finalmente, después de largas y numerosas observaciones, que si los movimientos de los otros astros errantes eran referidos al movimiento orbital de la tierra y se tomaba a esta última como base para determinar las dimensiones de la revolución de cada uno los demás astros, no sólo podían deducirse sus movimientos aparentes, sino también el orden y las dimensiones de todos los astros y orbes, apareciendo en el propio cielo una conexión tal que nada podía cambiarse en ninguna de sus partes sin que se siguiera una confusión de las restantes y del Universo entero […] [Copérnico pone el acento en este pasaje sobre la más sorprendente y manifiesta de las diferencias entre su sistema y el de Ptolomeo. En el sistema copernicano ya no es posible contraer o dilatar a voluntad la órbita de uno de los planetas manteniendo las primitivas dimensiones de las de los restantes. Por primera vez, la observación permite determinar el orden y las dimensiones relativas de todas las órbitas planetarias sin tener que recurrir a la hipótesis de las esferas que llenan por completo el espacio. Este último punto será discutido con mayor lujo de detalles cuando comparemos el sistema de Copérnico con el de Ptolomeo.]

No dudo ni por un momento que los matemáticos con talento y sólidos conocimientos sólo compartirán mi opinión si están dispuestos a estudiar y examinar, no superficialmente, sino en profundidad —tal y como lo exige esta ciencia—, los razonamientos que aporto en mi obra para sustentar la demostración de cuanto afirmo. Para que tanto sabios como ignorantes vean que no quiero eludir el juicio de persona alguna, he decidido dedicar mis investigaciones a Vuestra Santidad antes que a cualquier otra persona, pues, incluso en este alejado rincón de la tierra en el que vivo, estáis considerado como la persona más eminente, tanto en orden a la dignidad de vuestra ocupación como por vuestro amor a las letras y a las ciencias. Vuestra

autoridad y juicio pueden reprimir las mordeduras de los calumniadores, aunque el proverbio afirme que no existe remedio alguno contra la dentadura de los sicofantes.

Si, a pesar de todo, existieran charlatanes desocupados que, aún ignorando todo sobre matemáticas, se creyeran con derecho a juzgar mis opiniones y osaran censurar y atacar mi obra en base a algún pasaje de las Escrituras cuyo sentido hubieran distorsionado con malignas intenciones, desprecio e ignoro sus juicios como temerarios. Es bien sabido que Lactancio, escritor notable en muchos aspectos, aunque escaso de conocimientos matemáticos, ha opinado en términos pueriles sobre la forma de la tierra, mofándose de quienes habían descubierto su esfericidad. Así pues, los hombres doctos que sostengan mi doctrina no deberán encontrar extraño que algunas gentes de tal tipo intenten burlarse de mí. Las matemáticas son para los matemáticos quienes, si no yerro, considerarán que mis trabajos contribuyen a la mayor gloria de la República Eclesiástica de la que vuestra Santidad es Príncipe. No hace demasiado tiempo, bajo León X, cuando en el concilio de Letrán se debatió la cuestión de la reforma del calendario eclesiástico, ésta quedó en suspenso sólo porque se estimó que tanto la duración del año y de los meses como los movimientos del sol y de la luna no habían sido determinados con suficiente exactitud. Desde entonces, me he fijado el objetivo de estudiar tales asuntos con todo cuidado, alentado por el celebérrimo Pablo, obispo de Fossombrone y presidente de las antedichas deliberaciones encaminadas a establecer una reforma del calendario. Una vez perfilados y acabados estos estudios, someto sus resultados al juicio de Vuestra Santidad, así como al de todos los demás sabios matemáticos. Y ahora, para que no parezca a Vuestra Santidad que prometo sobre la utilidad de mi obra más de cuanto puedo en realidad ofrecer, paso de inmediato a exponer los resultados de mis investigaciones.

“Las matemáticas son para los matemáticos.” He aquí la primera gran incongruencia del *De revolutionibus*. Aunque son muy pocos los aspectos del pensamiento occidental que se vieron libres de las repercusiones de la

obra copernicana, el texto propiamente dicho posee un carácter muy técnico y profesional. Lo que Copérnico encontraba monstruoso no era la cosmología o la filosofía, sino la astronomía planetaria matemática, y sólo fue su deseo de modificar esta última el que le obligó a poner la tierra en movimiento. Si sus contemporáneos querían seguir el desarrollo de su pensamiento debían aprender a comprender sus detalladas explicaciones matemáticas sobre las posiciones de los planetas y considerar estos abstrusos razonamientos con mayor seriedad que el testimonio directo que les proporcionaban sus sentidos. Aunque la revolución copernicana no fuera por encima de todo una revolución en las técnicas matemáticas empleadas para calcular la posición de los planetas, tuvo su origen en este campo. Reconociendo la necesidad de introducir nuevas técnicas y desarrollándolas, Copérnico aportó su única contribución original a la revolución que lleva su nombre.

Copérnico no fue el primero en sugerir el movimiento de la tierra, ni tampoco pretendió jamás haber redescubierto por sí mismo tal idea. En su prefacio cita a la mayor parte de sabios de la antigüedad que habían defendido la idea de una tierra en movimiento. En un manuscrito más antiguo incluso hace referencia a Aristarco de Samos, cuyo universo centrado en el sol guarda una enorme semejanza con el suyo propio. Aunque no mencione de forma explícita, y esto era moneda al uso durante el Renacimiento, los trabajos de sus predecesores más inmediatos que creyeron que la tierra estaba, o podía estar, en movimiento, parece lícito suponer que tuvo conocimiento de algunos de ellos. Por ejemplo, aunque pueda haber carecido de toda noticia acerca de las contribuciones de Nicolás de Oresme al tema, es muy probable que como mínimo hubiera oído hablar del célebre tratado en que el cardenal Nicolás de Cusa deducía el movimiento terrestre de la pluralidad de mundos existente en el seno de un universo neoplatónico ilimitado. A pesar de que el movimiento de la tierra jamás había llegado a ser un concepto demasiado extendido, no puede afirmarse que en pleno siglo XVI careciera de precedentes. Lo que sí carecía de precedentes era el sistema matemático elaborado por Copérnico y basado en el movimiento terrestre. Copérnico fue el primero, a excepción quizá, de

Aristarco, en dar cuenta de que un movimiento de la tierra podía resolver un problema astronómico existente, o mejor aún, un problema estrictamente científico. Aun teniendo en cuenta la contribución de Aristarco, Copérnico fue el primero en exponer de forma detallada las consecuencias astronómicas que se derivaban del movimiento de la tierra. Las matemáticas de Copérnico le distinguen de sus predecesores, y es en parte a causa de la matematización que su obra, a diferencia de las de quienes le precedieron, inaugura una revolución.

La física y la cosmología de Copérnico

Para Copérnico, el movimiento terrestre era un derivado del problema de los planetas. Se apercibió del movimiento de la tierra al examinar los movimientos celestes y, dada la trascendental importancia que tenían para él estos movimientos, no se interesó demasiado por las dificultades que su innovación podía plantear al hombre medio, cuyas preocupaciones se centraban principalmente en los problemas del mundo sublunar, los problemas terrestres. Pero Copérnico no podía ignorar por completo los problemas que el movimiento de la tierra suscitaba en quienes poseían un sentido de los valores menos exclusivamente astronómico que el suyo propio. Como mínimo, debía ofrecer a sus contemporáneos la posibilidad de concebir la idea de un movimiento terrestre; debía dejar en claro que las consecuencias de este movimiento no eran tan devastadoras como generalmente se suponía. Estas razones inclinaron a Copérnico a comenzar el *De revolutionibus* con una presentación no técnica del universo que había construido para albergar a una tierra en movimiento. El introductorio libro Primero está dirigido a los profanos en el tema, y en él se recogen lodos los argumentos que en opinión de Copérnico podían ser comprendidos por aquellos lectores que carecieran de una formación astronómica específica.

A decir verdad, tales argumentos son muy poco convincentes. Excepción hecha de los que derivan del análisis matemático que Copérnico no consiguió explicitar con claridad en su Libro Primero, ya habían sido

empleados con anterioridad y no estaban en pleno acuerdo con los detalles del sistema astronómico que Copérnico iba a exponer en los cinco libros restantes. Sólo quien, como Copérnico, tuviera otras razones para suponer que la tierra se movía, podría haber tomado completamente en serio el contenido del Libro Primero del *De revolutionibus*.

Con todo, el Libro Primero del *De revolutionibus* no carece de importancia. Sus propios puntos débiles dejan entrever la incredulidad y la mofa con que iba a ser acogido el sistema copernicano por quienes no estaban preparados para seguir en detalle la discusión matemática expuesta en los libros restantes. Su estrecha y extensa dependencia de los conceptos y leyes aristotélicos y escolásticos muestran hasta qué punto el propio Copérnico era incapaz de sobreponerse a las corrientes de pensamiento dominantes en su época fuera del limitado dominio de su especialidad. Finalmente, las lagunas e incongruencias de este Libro Primero ilustran una vez más la enorme coherencia de la cosmología y astronomía tradicionales. Copérnico, impulsado a engendrar su revolución por motivos estrictamente astronómicos, intentó circunscribir su descubrimiento a dicho dominio, pero no pudo evitar por completo las devastadoras consecuencias cosmológicas derivadas del movimiento terrestre.

LIBRO PRIMERO

1. *Que el mundo es esférico*

Ante todo, debemos hacer notar que el mundo es esférico, sea porque ésta es la forma más perfecta de todas —totalidad integra sin ninguna juntura—; sea porque es la de mayor capacidad —la que mejor se adapta a contener y preservar todas las cosas [de todos los sólidos con una superficie dada, la esfera es la que encierra un mayor volumen]—; sea porque todas las partes separadas del mundo, como el sol, la luna y las estrellas, asumen tal forma; sea porque todas las cosas tienden a limitarse bajo tal forma, como nos lo muestran las gotas de agua y de otros cuerpos líquidos, que

tienden a autolimitarse. Nadie pondrá en duda, pues, que haya sido tal forma la asignada a los cuerpos divinos.

2. *Que la tierra también es esférica*

La tierra también es esférica, puesto que desde todos los lados se inclina [o cae] hacia su centro […]. Para aquellos que desde cualquier punto de la tierra se dirigen hacia el norte, el polo de la revolución diaria se eleva gradualmente, mientras que el otro polo se abate otro tanto; y muchas estrellas situadas cerca de las regiones septentrionales no desaparecen de nuestro campo de visión, mientras otras, situadas en el sur, no se elevan por encima del horizonte […]. Además los cambios de altitud del polo son siempre proporcionales a los trayectos recorridos sobre la superficie terrestre, hecho que no puede darse en ninguna otra figura que la esfera. Por consiguiente, queda de manifiesto que la tierra es finita y esférica [Copérnico concluye este capitulo con algunos argumentos adicionales sobre la esfericidad de la tierra característicos de las fuentes clásicas que hemos examinado anteriormente.]

3. *Cómo la tierra, junto con el agua, forma una sola esfera*

Las aguas diseminadas de un lado a otro de la tierra forman los mares y miman los más profundos declives. El volumen de agua debe ser menor que el de tierra a fin de que aquella no la inunde por completo, pues una y otra tienden hacia el mismo centro como consecuencia de su gravedad. Así pues, para resguardo de los seres vivos, el agua deja libres algunas partes de la tierra así como numerosas islas esparcidas aquí y allá. Pues, ¿qué es el continente y la totalidad de la tierra firme sino una inmensa isla?… [En este capitulo, Copérnico quiere demostrar a un mismo tiempo que el globo terrestre está esencialmente compuesto de tierra y que es necesaria una conjunción de ésta con el agua para hacer del globo una esfera. Probablemente, su propósito apunta más alto. El elemento tierra se rompe menos fácilmente que el agua cuando se mueve; en consecuencia, es más

plausible el movimiento de un globo sólido que el de uno líquido. Por otra parte, Copérnico acabará por decir que la tierra se mueve naturalmente según un círculo porque es estoica (cf. más adelante, capítulo 8 del Libro Primero del *De revolutionibus*). Por consiguiente, necesita demostrar que tanto la tierra como el agua son esenciales en la composición de la esfera y que ambas pueden participar en su movimiento natural. El pasaje tiene particular interés porque Copérnico demuestra, para ilustrar sus ideas sobre la estructura de la tierra, que está al corriente de los recientes viajes de exploración y las subsiguientes correcciones que debían llevarse a cabo en los escritos geográficos de Ptolomeo. Por ejemplo, dice:

Si el globo terrestre fuera esencialmente acuoso], la profundidad del océano aumentaría constantemente a partir de las orillas, con lo que los navegantes que se alejaran de ellas jamás encontrarían una isla, una roca o cosa alguna de naturaleza terrestre. Sin embargo, sabemos que entre el mar de Egipto y el golfo de Arabia, y situado en el medio de la gran masa de tierra, hay un estrecho de apenas más de quince estadios. Por otro lado, Ptolomeo considera en su *Cosmografía* que las tierras habitadas se extienden hasta el círculo medio [de la tierra; es decir, a través de un hemisferio que se extiende 180° al este de las islas Canarias], con una *terra incognita* más allá de donde los modernos han descubierto Cathay y extensísimas regiones que llegan hasta los 60° de longitud. Así pues, sabemos ahora que la tierra habitada abarca una extensión mucho mayor que la reservada al océano. Ello se hace aún más patente si añadimos las islas descubiertas en nuestra época bajo los príncipes de España y Portugal, particularmente América, que recibe su nombre del capitán que la ha descubierto, y que, a causa de sus dimensiones todavía mal conocidas, se considera que pueda ser un segundo continente. Si además tenemos en cuenta las numerosas islas que aún desconocemos, no deberá extrañarnos demasiado que existan antípodas o antíctonos [los habitantes del otro hemisferio]. En efecto, razones de índole geométrica nos llevan a creer que América ocupa una situación diametralmente opuesta a la cuenca del Ganges en la India […].

4. *Que el movimiento de los cuerpos celestes es uniforme, circular, o compuesto de movimientos circulares, y uniforme*

Reparemos ahora en que el movimiento de los cuerpos celestes es circular. En efecto, el movimiento [natural] de la esfera es girar en círculos; por medio de este propio acto expresa su forma; la del cuerpo más simple, donde no puede hallarse ni principio ni fin; la del que, si gira sobre sí mismo sin cambiar de lugar, siempre presenta idéntico aspecto. Dada la multiplicidad de los orbes, hay diversos tipos de movimiento. El más evidente de todos es la revolución cotidiana […] el espacio de tiempo del día y de la noche. A causa de este movimiento la totalidad del universo, excepción hecha de la tierra, se desliza desde el este al oeste. Dicho movimiento es tomado como la medida común de todos los demás ya que también el propio tiempo viene medido por el número de días. Después, vemos otras revoluciones contrarias a este movimiento y que se oponen a él en dirección de oeste a este. Se trata de las revoluciones del sol, la luna y los cinco planetas […].

Sin embargo, dichos cuerpos presentan varias diferencias en sus respectivos movimientos. Primeramente, sus ejes no son los de la revolución diurna, sino los del Zodiaco, oblicuos a aquél. En segundo lugar, no parecen moverse uniformemente en las órbitas que les son propias. En efecto, el sol y la luna tan pronto se mueven más lentamente como aumentan su velocidad; en cuanto a los otros cinco astros restantes, vemos cómo se paran aquí y allá, e incluso cómo vuelven atrás… Además, debe añadirse que algunas veces se aproximan a la tierra y se dice que están en su perigeo, mientras que otras se alejan de ella y están en su apogeo.

No obstante, debemos reconocer que sus movimientos son circulares o compuestos de varios círculos, pues dichas irregularidades están sujetas a una ley determinada y se reproducen periódicamente, lo que no podría darse si las órbitas no fueran circulares. En efecto, sólo el círculo puede restablecer el pasado; así, por ejemplo, el sol, sometido a una composición de movimientos circulares, nos trae de nuevo una y otra vez la desigualdad de los días y las noches así como las cuatro estaciones del año. En este

hecho debe reconocerse la conjunción de diversos movimientos, pues un cuerpo celeste simple no puede moverse irregularmente por acción de un solo orbe. En efecto, tal irregularidad sólo podría darse como consecuencia de la inconstancia de la virtud motriz —provenga ésta de una causa externa o sea de naturaleza íntima— o de modificaciones en la forma del propio cuerpo en revolución. Pero el intelecto retrocede horrorizado ante ambas suposiciones, pues es indigno suponer que suceda algo parecido en seres que han sido construidos según el mejor de los órdenes posibles. En consecuencia, debe admitirse que los movimientos regulares del sol, la luna y los planetas nos parecen irregulares, ya sea por las diferentes direcciones de sus ejes de revolución, ya porque la tierra no ocupa el centro de los círculos que recorren. Así pues, para nosotros que observamos desde la tierra, las trayectorias de dichos astros nos parecen más grandes cuando están cerca [de la tierra] que cuando están alejados (tal como se demuestra en óptica [o en la cotidiana observación de barcos o carruajes que parecen moverse más rápidamente cuanto más cerca están de nosotros]). Vistos desde diferentes distancias, movimientos [angulares] iguales de los orbes dan la sensación de cubrir trayectos diferentes en tiempos iguales. Por tal razón, creo que ante todo se hace necesario examinar atentamente cuál es la verdadera relación entre la tierra y el cielo, no sea que queriendo estudiar las cosas más altas acabemos ignorando las que nos son más próximas y, a causa de este mismo error, atribuyamos a los cuerpos celestes lo que pertenece a la tierra.

Copérnico nos ofrece en este pasaje la versión más completa y convincente que hayamos examinado hasta el momento del argumento tradicional tendente a limitar a círculos los movimientos de los cuerpos celestiales. Opina que sólo un movimiento circular uniforme, o una combinación de tales movimientos, puede explicar la repetición regular de todos los fenómenos celestes una vez transcurridos determinados intervalos de tiempo fijo. Hasta aquí, todos los razonamientos de Copérnico son aristotélicos o escolásticos, y es imposible distinguir su universo del propugnado por la cosmología tradicional. En ciertos aspectos, es incluso

más aristotélico que muchos de sus predecesores y contemporáneos. Por ejemplo, se resiste a admitir la violación, implícita en el uso de un ecuante, del movimiento uniforme y simétrico de una esfera.

Por ahora, la radicalidad de Copérnico brilla por su ausencia. Sin embargo, no puede posponer por más tiempo la introducción del movimiento de la tierra. Ha llegado el momento de romper con la tradición y, ciertamente de forma muy curiosa, es en esta ruptura donde Copérnico muestra de forma más clara su estrecha dependencia con respecto a la misma. Hasta donde le es posible se mantiene aristotélico dentro de la propia disidencia. En la discusión general sobre el movimiento que se inicia en el capítulo quinto del Libro Primero y que culminará en los capítulos octavo y noveno, Copérnico sugiere que, puesto que la tierra es una esfera como los demás cuerpos celestes, también debe participar de los movimientos circulares compuestos que, según él, son naturales a toda esfera.

5. *Sobre si conviene a la tierra un movimiento circular y de su posición en el espacio*

Ya se ha demostrado que la tierra tiene forma de esfera; debe ahora examinarse si se le acomoda a su forma algún tipo de movimiento, sin el que no sabríamos dar una explicación justa de los fenómenos celestes, y cuál sería la posición en el espacio que éste le asignaría. Ciertamente, se acostumbra a admitir por parte de las autoridades en la materia que la tierra se halla en reposo en el centro del mundo, de forma que consideran insostenible e incluso ridícula la opinión contraria. Sin embargo, examinando esta cuestión con mayor cuidado, veremos que en modo alguno se halla resuelta de forma definitiva, por lo que se hace necesario someterla a un estudio más profundo. En efecto, todo cambio de posición aparente proviene del movimiento de la cosa vista o del movimiento del espectador o de movimientos desiguales de ambos, espectador y objeto, pues cuando dos móviles gozan de movimientos iguales y paralelos es imposible percibir un

movimiento relativo del uno respecto al del otro. La rotación de los cielos la percibimos desde la tierra, con lo que cualquier movimiento de ésta quedaría reflejado en todas las cosas exteriores como si se movieran con idéntica velocidad a la suya, pero en sentido contrario.

Tal sucede con la revolución diaria. Ésta parece arrastrar el universo entero a excepción de la tierra y de las cosas que se hallan en sus proximidades. No obstante, si se admite que la tierra gira del oeste al este, se observará, al examinar seriamente tal suposición, lo adecuado de la misma. Y puesto que el cielo es el receptáculo de todas las cosas, ¿por qué no atribuir el movimiento al contenido antes que al continente? Este último fue el punto de vista mantenido por los pitagóricos Heráclides y Ecfanto y, según Cicerón, por Hicetas de Siracusa, quienes hacían girar la tierra en el centro del universo y creían que las estrellas se ponen por interposición de la tierra y salen una vez ésta ha retrocedido.

Admitida la posibilidad de un movimiento de la tierra, se plantea el problema no menos grave de cuál es su posición, aunque hasta ahora casi todo el mundo haya sostenido que ocupa el centro del universo. [De hecho, si la tierra puede moverse en cualquier dirección, quizá goce de algo más que de mi simple movimiento axial en torno al centro del universo; tal vez se mueva alejándose por completo de dicho centro, y hay algunas buenas razones astronómicas para suponer que así lo hace.] Supongamos que la tierra no está exactamente en el centro del universo, sino a una distancia del mismo que, si bien pequeña comparada con las dimensiones de la esfera estelar, es considerable y aparente en comparación con las de los orbes del sol y de los demás planetas, y, además, que las irregularidades aparentes que muestran los movimientos celestes se deben de forma única y exclusiva al hecho de no estar centrados en la tierra. Bajo tales premisas, es muy posible que pudiera aducir una causa razonable para explicar las irregularidades de los movimientos aparentes. En realidad, puesto que los astros errantes varían en su posición con respecto a la tierra, aproximándose unas veces y alejándose otras, se deduce necesariamente que ésta no es el centro de sus círculos. Lo que no está claro es si son los planetas los que se

acercan y se alejan de la tierra, o es la tierra la que se acerca y se aleja de ellos.

Por otro lado, si alguien atribuyese a la tierra algún otro movimiento además de la revolución diaria, el hecho estaría plenamente justificado. En efecto, se dice que Filolao el pitagórico, un notable matemático, creía que la tierra posee a otros varios movimientos además del de rotación, considerándola como un planeta más. Es para comprobar tal extremo que, tal como lo atestiguan sus biógrafos, Platón no titubeó en trasladarse a Italia.

Copérnico subraya aquí la ventaja más inmediata que presenta para los astrónomos admitir el concepto de una tierra en movimiento. Si la tierra se desplaza sobre una órbita circular alrededor del centro y a un mismo tiempo gira alrededor de su eje, es posible explicar, al menos de forma cualitativa, los movimientos de retrogradación y los diferentes períodos empleados por un planeta en sucesivos recorridos a lo largo de la eclíptica y prescindiendo por completo de los epiciclos. En el sistema de Copérnico las irregularidades mayores de los movimientos planetarios sólo son aparentes. Visto desde una tierra en movimiento, un planeta, cuyo movimiento es de hecho regular, parecerá comportarse irregularmente. Por tal razón, piensa Copérnico, deberíamos creer en un movimiento orbital de la tierra. Con todo, es bastante curioso constatar que Copérnico jamás demuestra este punto con mayor claridad que la desplegada en el pasaje precedente en las partes de su libro accesibles al lector profano en astronomía. Asimismo, tampoco demuestra las otras ventajas astronómicas a que alude. Copérnico pide al lector no versado en matemáticas que las admita de buen principio, a pesar de que dichas ventajas no sean demasiado difíciles de demostrar desde un punto de vista cualitativo. La exposición explícita de las auténticas ventajas que aporta su sistema sólo aparece en los últimos libros del *De revolutionibus*, pero puesto que en ellos no trata de los movimientos retrógrados en general, sino de abstrusos detalles cuantitativos de las retrogradaciones particulares de cada uno de los planetas, sólo el lector iniciado en astronomía podía descubrir el significado de la indicación hecha

en las primeras páginas de su obra. La falta de claridad de Copérnico quizás haya sido deliberada, pues ya en un pasaje anterior ha hecho referencia, prestándole plena aprobación, a la tradición pitagórica que recomendaba disimular los secretos de la naturaleza a quienes no habían sido purificados por el estudio de las matemáticas (y por otros ritos más místicos). De todas formas, esta falta de claridad explica en parte la recepción dispensada a su obra.

En las dos secciones posteriores del presente capítulo examinaremos en detalle las consecuencias astronómicas del movimiento de la tierra, pero antes de hacerlo debemos completar este esbozo general de la física y la cosmología copernicanas. Omitiremos el capítulo sexto, titulado *De la inmensidad del cielo comparado con las dimensiones de la tierra*, y pasaremos a los capítulos centrales del Libro Primero en los que Copérnico, después de pedir a los lectores indulgentes que admitan la existencia de una serie de argumentos astronómicos que hacen necesario el movimiento terrestre alrededor del centro, intenta hacerlo plausible desde el punto de vista físico.

7. *Por qué los antiguos han creído que la tierra está inmóvil en medio del universo como su centro*

Los antiguos filósofos intentaron demostrar por diversos métodos que la tierra permanece fija en medio del universo. El principal alegato en favor de dicha tesis era la doctrina de la gravedad y la liviandad. Según ésta, la tierra es el elemento más pesado y todas las cosas pesadas se mueven hacia ella, se precipitan hacia su centro. Dada la esfericidad de la tierra, si no se vieran retenidas por su superficie, estas cosas pesadas, que en virtud de su propia naturaleza se mueven en dirección vertical hacia la tierra, se reunirían en su mismo centro, pues toda línea perpendicular a un punto de la esfera hacia aquél lleva. Ahora bien, parece ser que las cosas que se dirigen hacia el centro lo hacen para reposar en él. Así pues, con mayor razón, la tierra permanecería inmóvil en el centro del universo gracias a su propio peso y recibiendo en él a todo cuanto cae.

También intentan probar su tesis mediante un razonamiento fundado en el movimiento y su naturaleza. Aristóteles afirma que el movimiento de un cuerpo único y simple es simple, que los movimientos simples son circulares o rectilíneos y que éstos últimos pueden estar dirigidos hacia arriba o hacia abajo. Por consiguiente, todo movimiento simple está dirigido hacia el centro, es decir, hacia abajo, o procede de él, es decir, hacia arriba, o se efectúa a su alrededor, siendo este último el movimiento circular. [Según la física aristotélica y escolástica, los movimientos naturales, los únicos que pueden producirse en ausencia de impulsos externos, están originados por la naturaleza del cuerpo que se mueve. El movimiento natural de cada uno de los cuerpos simples (los cinco elementos: tierra, agua, aire, fuego, y éter) debe ser simple ya que es consecuencia de una naturaleza simple o elemental. Finalmente, sólo hay tres movimientos (geométricamente) simples en el universo esférico: el movimiento hacia arriba, el movimiento hacia abajo y el movimiento circular alrededor del centro.] Ahora bien, caer, es decir, dirigirse hacia el centro, sólo conviene a los pesados como la tierra y el agua. Por el contrario, el aire y el fuego, elementos provistos de liviandad, se elevan, se alejan del centro. Parece conveniente asignar movimiento rectilíneo a los cuatro elementos; por contra, los cuerpos celestes deben girar alrededor del centro. Así dice Aristóteles.

Así pues, dice Ptolomeo de Alejandría, aunque nos limitáramos a suponer a la tierra una revolución cotidiana, deberíamos aceptar todo lo contrario de cuanto acabamos de exponer. Este movimiento que en veinticuatro horas impartiera una rotación completa a la tierra debería ser en extremo violento y de una velocidad insuperable. Pero las cosas que giran con gran rapidez parecen ser totalmente inaptas para agruparse o, si están unidas [parecen], tender a dispersarse, a menos que se mantenga su cohesión gracias a alguna fuerza. Ptolomeo dice a continuación que haría ya mucho tiempo que los fragmentos de la tierra habrían rebasado los propios límites del cielo (lo cual es perfectamente ridículo) y que, con mayor razón, lo habrían hecho los seres vivos y todos los seres pesados. Si las cosas cayeran libremente según líneas perpendiculares a la superficie terrestre, no

llegarían al lugar que les está destinado pues, mientras tanto, la tierra se habría movido con gran rapidez bajo los cuerpos situados fuera de ella. Asimismo, también veríamos cómo las nubes y demás cosas que flotan en el aire se dirigen constantemente hacia el oeste.

8. *Insuficiencia de las razones anteriormente aducidas y refutación de las mismas*

Por éstas y otras razones similares, afirman que la tierra permanece inmóvil en el centro del universo y que no hay ningún género de duda al respecto. Pero si alguno opinara que la tierra se mueve, ciertamente diría que su movimiento es natural, no violento [es decir, debido a la acción de una fuerza exterior]. Las cosas que acaecen de manera natural producen efectos contrarios a los que tienen por origen la violencia. En efecto, las cosas a las que se aplica la fuerza o la violencia deben ser necesariamente destruidas y no pueden subsistir demasiado tiempo; por contra, los procesos naturales acontecen de forma conveniente y permanecen en su óptima disposición [en otras palabras, si la tierra se mueve lo hace porque así está implícito en su naturaleza, y un movimiento natural no puede ser jamás desbaratador].

Ptolomeo no debe pues temer por una destrucción de la tierra y de todas las cosas terrestres a causa de una rotación producida por la acción de la naturaleza, muy diferente a la del arte o a la que pueda resultar del ingenio humano. ¿Pero por qué no siente aún mayor temor por la suerte del universo, cuyo movimiento debe ser muchísimo más rápido dado el enorme tamaño de los cielos comparado con el de la tierra? ¿Acaso el cielo ha adquirido tan inmenso tamaño porque este movimiento lo aleja del centro del universo con indecible vehemencia? ¿Quizá sufriría un colapso el cielo si cesara tal movimiento? Ciertamente, si fuera válido este argumento, las dimensiones del cielo serían infinitas. En efecto, cuanto más se expandiera a causa de la propia fuerza de su movimiento, tanto más se aceleraría éste, ya que cada vez sería mayor la circunferencia que debería recorrer en un lapso de veinticuatro horas. Y por el contrario, la inmensidad del cielo

aumentaría con el incremento de su movimiento. Así pues, velocidad y tamaño se incrementarían uno a otro hasta el infinito […].

Dicen que fuera del cielo no hay ni cuerpos, ni espacio, ni vacío, ni absolutamente nada y que, por consiguiente, [nada] hay donde el cielo pueda ubicar su expansión; en tal caso, es ciertamente asombroso que alguna cosa pueda ser detenida por nada. Quizá sería más fácil comprender que nada hay fuera del cielo, que todo está en su interior, sean cuales sean sus dimensiones, si se admite que el cielo es infinito y sólo está limitado por una concavidad interior; pero en este caso el cielo sería inmóvil […].

Dejemos en manos de los filósofos naturales estas disputas acerca de la finitud o infinitud del mundo. En todo caso, lo que sabemos con certeza es que la tierra, entre sus polos, está limitada por una superficie esférica. ¿Por qué seguir vacilando en atribuirle un movimiento que se avenga con su naturaleza y forma? ¿Por qué sacudir violentamente el mundo entero, cuyos limites nos son desconocidos e imposibles de conocer, y no admitir que la realidad de esta revolución cotidiana pertenece a la tierra, mientras que al cielo le corresponde su apariencia? No hacerlo es comportarse como Eneas de Virgilio cuando dice: “Salimos del puerto y retroceden tierras y ciudades”.

Cuando un navío flota en un mar encalmado, sus tripulantes creen que todas las cosas exteriores están en movimiento mientras que ellos y todo cuanto hay en la nave permanece en reposo, pero en realidad es ésta la que se mueve. Quizá sea por un razonamiento similar por lo que se admite de forma generalizada que el mundo entero se mueve alrededor de la tierra. ¿Y qué diremos respecto a las nubes y a los demás objetos que flotan en el aire, así como de los que caen o se elevan? Simplemente que no sólo se mueven la tierra y el elemento acuoso a ella vinculado, sino también una parte no despreciable de aire y todas las cosas que, de este mismo modo, tienen una relación con la tierra. Quizás el aire próximo a la tierra contenga una mezcla de materia terrestre y acuosa que le haga participar de la misma naturaleza que la tierra, o quizás adquiera un movimiento a causa de su contigüidad con la tierra, animada de perpetua rotación y de la que participa sin resistirse […].

En cuanto a las cosas que caen y se elevan, cabrá reconocer que su movimiento puede ser doble con respecto al mundo y, generalmente, de tipo rectilíneo y circular. [Éste es el análisis primitivamente efectuado por Oresme.] Por lo que respecta a las cosas pesadas que son arrastradas hacia abajo por ser básicamente terrosas es indudable que las partes conservan la misma naturaleza que el todo al que pertenecen […]. [Por ejemplo, una piedra arrancada de la tierra continuará moviéndose circularmente junto a ésta y simultaneará dicho movimiento con una caída rectilínea hacia la superficie terrestre. El movimiento resultante será un cierto tipo de espiral, idéntico al seguido por un insecto que se dirigiese hacia el centro de una rueda de alfarero.]

Por consiguiente, tal como se ha dicho, a un cuerpo simple le corresponde un movimiento simple —afirmación primordialmente cierta en lo que respecta al movimiento circular— mientras aquél se mantenga en su estado y lugar naturales. En este caso sólo es posible el movimiento circular, que permanece por completo en sí mismo y es similar al reposo. Por el contrario, el movimiento rectilíneo es el propio de aquellos cuerpos que abandonan su lugar natural, ya sean expulsados o se alejen de él por cualquier otro motivo. Nada repugna tanto al orden y a la forma del Universo entero como que algo se halle fuera de su lugar. Así pues, el movimiento rectilíneo sólo es propio de las cosas que no se hallan en orden y que no están en perfecto acuerdo con su naturaleza por haberse separado de un todo y haber abandonado su unidad […]. [La argumentación de Copérnico muestra cuán rápidamente desaparece la tradicional distinción entre regiones celestes y terrestres cuando la tierra se convierte en un planeta. En este punto se limita a aplicar a la tierra un argumento tradicionalmente asociado a los cuerpos celestes: el de que el movimiento circular, sea simple o compuesto, es el más similar al reposo. En consecuencia, puede ser tan natural para la tierra como siempre lo ha sido para los cielos, pues no puede en modo alguno romper la unidad y regularidad del universo. Por otro lado, el movimiento rectilíneo no es natural para un objeto situado en su ubicación natural, pues es un

movimiento destructor, y un movimiento natural que destruya el universo es un supuesto completamente absurdo.]

A todo ello cabe añadir cuánto más noble y divino se considera el estado de inmovilidad que el de mutabilidad e inestabilidad, mucho más adecuado este último a la tierra que al universo. ¿No parece pues bastante absurdo atribuir el movimiento al continente o ubicación que al contenido y ubicado, es decir, a la tierra?

Finalmente, puesto que de forma manifiesta los planetas se aproximan y alejan de la tierra, el movimiento de todo cuerpo alrededor del centro —ellos los aristotélicos quieren que sea el centro de la tierra— será a la vez hacia el interior y hacia el exterior. [Y esto viola las propias leyes de que los aristotélicos deducen la posición central de la tierra, pues, según las mismas, los planetas deben tener un solo movimiento.] Por consiguiente cabe concebir de forma más general el movimiento alrededor del centro y contentarse con que cada movimiento tenga un centro propio. De todas las consideraciones anteriores se desprende que es más probable una tierra en movimiento que en reposo, especialmente en lo que concierne a la revolución cotidiana, la más propia de la tierra […].

9. *Si pueden ser atribuidos varios movimientos a la tierra*, *y del centro del mundo*

Puesto que nada se opone al movimiento de la tierra, creo que ahora debemos examinar si no sería conveniente atribuirle varios de ellos, con lo que quedaría equiparada a un planeta.

El desigual movimiento aparente de los planetas y la variación de sus distancias con respecto a la tierra nos demuestran que ésta no es el centro de todas las revoluciones. Tales hechos serían inexplicables si los planetas se movieran siguiendo círculos concéntricos con la tierra. Puesto que hay varios centros; es decir, un centro para todos los movimientos orbitales, un centro para la propia tierra, y quizás incluso otros varios centros no estará de más preguntarse si el centro del mundo es el de la gravedad terrestre o cualquier otro. Por mi parte, creo que no es otra cosa que una cierta

apetencia natural que la providencia divina del Creador del mundo ha asignado a cada una de sus partes para que se agrupen en su unidad e integridad formando un globo. Y puede muy bien admitirse que tal tendencia también la poseen el sol, la luna y los demás astros errantes, de tal forma que gracias a ella se nos muestran bajo forma esférica a pesar de la diversidad de trayectorias que siguen. Bajo el supuesto de que la tierra efectúe otros movimientos alrededor de su centro, será necesario que sean de tipo similar a los observados en muchos fenómenos [planetarios] que tengan un período anual [mostrándose la tierra muy similar a los planetas desde otros muchos puntos de vista.] Si transferimos el movimiento del sol a la tierra, concediendo la inmovilidad al sol, la salida y la puesta de las estrellas fijas, gracias a los que tan pronto amanece como anochece, se mantendrían inalterables, y veríamos que las estaciones, retrogradaciones y progresiones de los planetas tenían su origen no en el movimiento de éstos, sino en el de la tierra.

Finalmente, deberemos admitir que el sol ocupa el centro del mundo. La ley y el orden que hacen derivar unas de otras así como la armonía existente en el mundo, nos enseñan que tales son las cosas que ocurren en el universo con sólo mirar, por así decirlo, con los ojos bien abiertos.

Hemos visto cómo Copérnico desarrolla en estos tres últimos capítulos su teoría del movimiento, un esquema conceptual concebido para poder intercambiar las funciones de la tierra y del sol sin que por ello quede destruido un universo esencialmente aristotélico. Según la física de Copérnico, toda la materia, ya sea celeste o terrestre, tiene tendencia natural a agregarse en esferas que, por su propia naturaleza, adoptan de inmediato un movimiento de rotación. Una porción de materia separada de su posición natural continúa girando con su esfera al tiempo que retorna a aquella por medio de un movimiento rectilíneo. Se trata en verdad de una teoría incongruente en grado sumo (como se demostrará con cierto detalle en el capítulo 6) y escasamente original, excepción hecha de sus partes más inconexas. Quizá Copérnico la reelaborara por su propia cuenta, pero la mayor parte de sus elementos esenciales, tanto de su crítica a Aristóteles

como de su teoría del movimiento, ya aparecen en los escritos de los escolásticos, especialmente en la obra de Nicolás de Oresme. Además cabe constatar que su poca plausibilidad es menos manifiesta en los escritos de Nicolás de Oresme dado el carácter más limitado del problema que éste pretendía resolver.

No obstante, su fracaso en el intento de proporcionar unos fundamentos físicos adecuados al movimiento terrestre no desacredita a Copérnico. Su concepción o aceptación del movimiento de la tierra jamás fue deducida de razones físicas. La escasa agudeza con que trata los problemas físicos y cosmológico del movimiento terrestre en el Libro Primero le son totalmente imputables, pero tales problemas no son realmente suyos y quizá los hubiera evitado de haber podido hacerlo. Las insuficiencias de la física copernicana son una buena muestra de hasta qué punto las consecuencias de su innovación astronómica sobrepasaron el problema que les había dado origen, así como de cuán escasa era la aptitud del propio autor del descubrimiento para asimilar la revolución nacida de su obra. El movimiento de la tierra es una anomalía en un universo aristotélico clásico, estructura conservada por Copérnico en su *De revolutionibus* para todos aquellos puntos susceptibles de mostrar un cierto grado de compatibilidad con el movimiento terrestre. Como dice el propio Copérnico, simplemente se ha transferido el movimiento del sol a la tierra. Por consiguiente, el sol no es una estrella, sino el cuerpo central único a cuyo alrededor se encuadra el universo, un astro que hereda las antiguas funciones de la tierra y adquiere algunas otras nuevas. Pronto descubriremos que el universo de Copérnico sigue siendo infinito y que aún son las esferas concéntricas las que arrastran a los planetas a pesar de que ya no puedan seguir siendo arrastradas por la esfera exterior, ahora en reposo. Todos los movimientos deben estar compuestos por una combinación de círculos; Copérnico no puede prescindir de los epiciclos para explicar el movimiento de la tierra. La revolución copernicana difícilmente puede encontrarse en el propio texto del *De revolutionibus*, y ésta es la segunda incongruencia esencial que presenta el famoso texto.

La astronomía copernicana. Las dos esferas

No hemos revisado por completo el Libro Primero del *De revolutionibus*, pero los capítulos décimo y undécimo, inmediatamente posteriores al último pasaje citado, tratan de materias más próximas a la astronomía y los analizaremos en el contexto de una discusión astronómica que excede los límites de las demostraciones que Copérnico puso al alcance de los lectores profanos. Volveremos, pues, brevemente sobre el texto de Copérnico en un próximo párrafo, aunque antes de hacerlo intentaremos descubrir por qué los astrónomos se sintieron impresionados con más fuerza que los profanos ante la nueva propuesta copernicana. Difícilmente hallaremos en el Libro Primero del *De Revolutionibus* una respuesta a esta cuestión.

Copérnico atribuyó a la tierra tres movimientos circulares simultáneos: una rotación cotidiana axial, un movimiento orbital anual y un movimiento cónico y anual del eje. La rotación diaria hacia el este es la que explica los círculos cotidianos aparentes descritos por las estrellas, el sol, la luna y los planetas. Si la tierra está situada en el centro de la esfera estelar y completa cada día una revolución hacia el este alrededor de un eje que pasa por sus polos norte y sur, todos los objetos en reposo, o casi en reposo, con respecto a la esfera de las estrellas dan la sensación de desplazarse en dirección oeste a lo largo de arcos de círculo situados por encima del horizonte, arcos exactamente idénticos a los que vemos que describen los cuerpos celestes en el transcurso del tiempo.

Si los argumentos de Copérnico o de Nicolás de Oresme sobre este efecto son confusos, pueden tomarse de nuevo como punto de referencia los trayectos estelares representados en las figuras 6 y 7 (pp. 32 y 33). Dichas trayectorias pueden ser reproducidas, ya sea por un movimiento circular de las estrellas ante un observador inmóvil (explicación de Ptolomeo), ya sea por una rotación del observador ante una bóveda estelar fija (explicación de Copérnico). Examinemos el nuevo universo de las dos esferas que se representa en la figura 26, una reproducción simplificada del esquema usado cuando discutimos el movimiento de las estrellas en el seno del

universo de las dos esferas (figura 11, p. 44), con la diferencia de que ahora se ha invertido el sentido de la rotación y ésta se efectúa, no alrededor de un eje que une los polos celestes, sino del eje que determinan los polos de la tierra. Cuando nos servimos por primera vez de tal tipo de diagrama, mantuvimos inmóviles la tierra, el observador y el plano del horizonte, e hicimos girar hacia el oeste la esfera de las estrellas. Ahora lo que debemos mantener inmóvil es la esfera exterior, haciendo girar hacia el este el conjunto formado por la tierra, el observador y el plano del horizonte. Un observador situado en el centro del plano del horizonte que se mueva solidariamente con éste será incapaz de encontrar, al menos partiendo de cuanto puede ver en el cielo, cualquier diferencia entre ambos casos. Tanto en uno como en otro, verá cómo estrellas y planetas aparecen por el lado este de la línea de horizonte y se desplazan sobre su cabeza hacia el oeste a lo largo de idénticas trayectorias circulares.

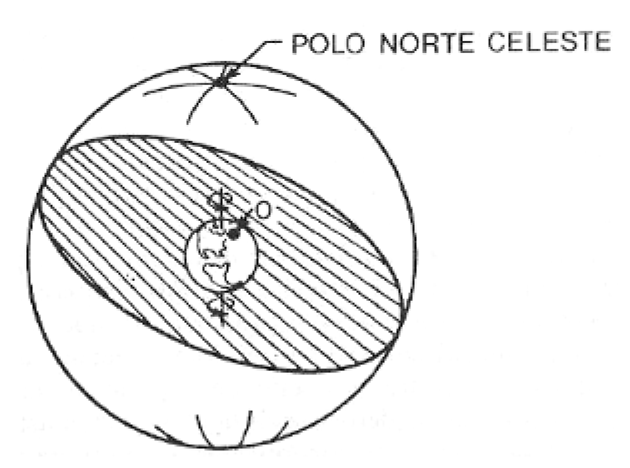


FIGURA 26. — Tierra en rotación situada en el centro de una esfera estelar estacionaria. Comparando este diagrama con el ofrecido en la figura 11, se observará que aquí el plano de horizonte debe girar solidariamente con la tierra para conservar su posición geométrica relativa respecto al observador situado en *O*.

Hasta ahora nos hemos limitado a considerar una tierra en rotación situada en el centro de la esfera inmóvil de las estrellas; es decir, hemos fijado nuestro análisis en el universo que sugirió Heráclides y posteriormente desarrolló Nicolás de Oresme. Sin embargo, éste es sólo el primer paso hacia un universo copernicano; el siguiente es más radical y más difícil. Tal como Copérnico señala en el fragmento del capítulo quinto

que hemos citado en páginas anteriores, desde el mismo momento en que admitimos la posibilidad de un movimiento terrestre debemos estar preparados para considerar, no sólo un movimiento en el centro del universo, sino también un movimiento que la aleje de él. De hecho, dice Copérnico, una tierra en movimiento no tiene necesidad alguna de estar situada en el centro; sólo es preciso que esté relativamente cerca del mismo y, siendo tal su posición, puede perfectamente desplazarse a su alrededor sin afectar para nada al movimiento aparente de las estrellas. Era ésta una conclusión difícilmente aceptable por sus colegas astrónomos ya que, a diferencia de la idea de inmovilidad de la tierra que sólo se deduce del sentido común y de la física terrestre, la noción de la posición central de la misma puede, en apariencia, derivarse de la observación astronómica directa. Así pues, la concepción copernicana de una tierra no central parece entrar en conflicto con las consecuencias inmediatas de la simple observación astronómica. Fue precisamente para evitar dicho enfrentamiento (u otra contradicción estrechamente relacionada con él que examinaremos al final de la próxima sección) por lo que Copérnico se vio obligado a aumentar considerablemente las dimensiones de la esfera estelar y dar un primer paso hacia la concepción de un universo infinito, que acabaría siendo elaborado por sus sucesores. Copérnico discutió el problema de la posición de la tierra en el universo dentro del capítulo sexto del Libro Primero del *De revolutionibus*. Si no hemos incluido dicho capítulo en páginas anteriores se debe a que para nuestros propósitos expositivos necesitamos una versión más clara e inteligible del problema.

Aparentemente, puede deducirse la posición de la tierra en el centro de la esfera de las estrellas de la siguiente observación: el horizonte de cualquier observador terrestre biseca la esfera estelar. Por ejemplo, el equinoccio de primavera y el equinoccio de otoño ocupan puntos diametralmente opuestos en la esfera de las estrellas, pues vienen definidos como los puntos de intersección de dos círculos máximos, el ecuador celeste y la eclíptica. La observación nos muestra que cuando uno de estos puntos se eleva por el este sobre el horizonte el otro se pone por el oeste. Lo mismo sucede con cualquier otro par de puntos diametralmente opuestos; es

decir, siempre que uno de ellos sale, el otro se pone. Aparentemente, la única explicación que cabe a tales observaciones es, tal como se demuestra en la figura 26 o en la figura 11, suponer que el plano de horizonte pasa por el centro de la esfera estelar y la divide en dos partes iguales según un círculo máximo. Dos puntos diametralmente opuestos en la esfera de las estrellas son los que cuando uno se levanta el otro se pone si, y solamente si, el plano de horizonte corta dicha esfera según un círculo máximo.

Pero otra de las condiciones que deben cumplir todos los planos de horizonte es ser tangentes a la esfera terrestre. (Este aspecto no es observable en las figuras 26 y 11 sólo porque hemos exagerado de forma considerable las dimensiones de la tierra.) Por consiguiente, todo observador se encuentra prácticamente en el centro de la esfera estelar o muy cerca de él, ubicación que obviamente corresponde a la tierra. La tierra debe ser muy pequeña, casi un punto, y ocupar una posición central. Si, tal como se muestra en la figura 27, la tierra (representada por el círculo concéntrico interior) fuera muy grande con respecto a la esfera de las estrellas o, suponiéndola representada ahora por el punto negro, fuera pequeña pero desplazada con respecto al centro, el plano de horizonte no cortaría en dos partes iguales la esfera estelar y dos puntos diametralmente opuestos sobre la misma ya no serían los que al salir uno se pusiera el otro.

Tal como acabamos de desarrollarlo, el precedente razonamiento pone de manifiesto por sí mismo la debilidad explotada por Copérnico. La observación no muestra ni que la tierra deba ser un punto (si así lo hiciera, tanto el universo ptolemaico como el aristotélico estarían en conflicto con la observación), ni que deba estar justo sobre el centro, pues la observación jamás puede decir, por ejemplo, que el equinoccio de primavera sale *exactamente* cuando se pone el equinoccio de otoño. Observaciones a simple vista poco refinadas se limitarán a constatar que cuando el equinoccio de primavera se levanta sobre el horizonte el equinoccio de otoño está más o menos un grado por encima de él. Una observación a simple vista efectuada con toda meticulosidad (y convenientemente corregida de los efectos de la refracción atmosférica y de las irregularidades de todo horizonte real) podría mostrar que, en el preciso instante en que el

punto solsticial de invierno alcanza el horizonte oeste, el punto solsticial de verano está a menos de 6' (o 0,1°) del horizonte este. Ésta es la máxima precisión que podrá alcanzarse en una observación a simple vista. Por consiguiente, lo que nos indicará la observación es que el plano de horizonte corta la esfera estelar en dos partes *casi exactamente* iguales y que, por lo tanto, todos los observadores terrestres están situados muy cerca del centro del universo. Claramente el grado de aproximación con que se determinarán las dimensiones relativas de estas dos partes y la distancia al centro de cualquier observador terrestre dependen de la precisión de las observaciones.

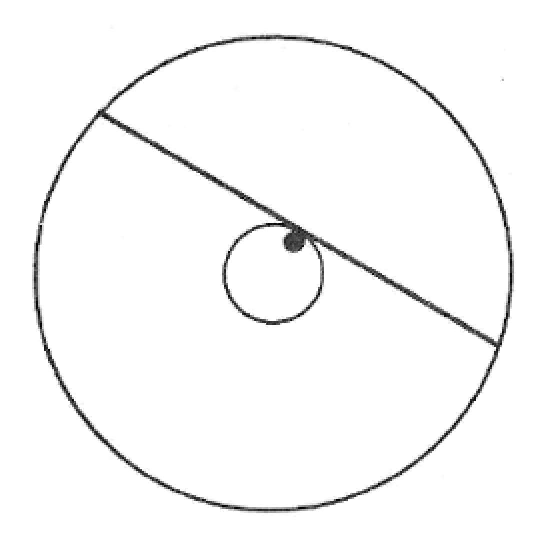


FIGURA 27. — El plano de horizonte no biseca la esfera estelar si el diámetro terrestre es de longitud apreciable con respecto al de dicha esfera o si la tierra está suficientemente alejada de la misma.

Por ejemplo, si se observa que siempre que uno de los puntos solsticiales está sobre el horizonte el otro no se halla *a más de 0,1°* del mismo, podremos deducir que ningún observador terrestre puede estar a una distancia del centro de la esfera estelar superior a 0,001 veces su radio. Si lo que nos revela la observación (por otro lado, pocas son las observaciones a simple vista que permiten, aunque sólo sea aproximadamente, alcanzar este grado de precisión) es que cuando uno de los puntos solsticiales está justo sobre el horizonte el otro no está a más de 0,01° del mismo, podremos deducir que la esfera interior de la figura 27 no puede tener un radio

superior a 0,0001 veces el de la esfera exterior. La tierra siempre deberá hallarse inmersa por completo en el círculo interior, pues, si saliera de él, el plano de horizonte ya no cortaría la esfera estelar en dos partes iguales con una aproximación inferior a los 0,01° y nuestras observaciones hipotéticas pondrían al descubierto la discrepancia. Sin embargo, mientras la tierra se encuentre en cualquier parte dentro del círculo interior, el plano de horizonte parecerá, dentro de los límites de precisión marcados por nuestras observaciones, bisecar la esfera de las estrellas.

Éste es el razonamiento de Copérnico. La observación sólo nos obliga a mantener la tierra dentro de una pequeña esfera concéntrica a la esfera estelar. Dentro de los límites de dicha esfera interior, la tierra puede desplazarse con toda libertad sin violar las apariencias. En particular, puede tener un movimiento orbital alrededor del centro, o alrededor del sol central, ya que su órbita jamás le lleva demasiado lejos de éste, donde “demasiado lejos” sólo significa “demasiado lejos con respecto al radio de la esfera exterior”. Suponiendo conocidos el radio de la esfera exterior y el grado de precisión de unas determinadas observaciones, éstas nos permitirán atribuir un límite para el radio *máximo* de la órbita terrestre. Si se conocen las dimensiones de la órbita terrestre (que en teoría pueden determinarse con la técnica empleada por Aristarco para medir la distancia tierra-sol) y el grado de precisión de unas determinadas observaciones, éstas permitirán atribuir un límite al tamaño *mínimo* de la esfera de las estrellas. Por ejemplo, si la distancia entre el sol y la tierra es, como indica la medición de Aristarco descrita en el Apéndice técnico, igual a 764 diámetros terrestres (1.528 radios terrestres) y se sabe que las observaciones han sido efectuadas con una precisión de alrededor de 0,1°, podemos deducir que el radio de la esfera estelar es igual o superior a 1.000 veces el radio de la órbita terrestre; es decir, igual a un mínimo de 1.528.000 radios de la tierra.

Aunque las observaciones de Copérnico no alcanzaran este grado de precisión, el ejemplo numérico que acabamos de exponer es de gran utilidad ya que su inmediato sucesor, Tycho Brahe, trabajó con una precisión aún superior a los 0,1° tomados como referencia. Así pues,

nuestro ejemplo constituye una estimación representativa de las dimensiones mínimas de la esfera de las estrellas que debía admitir un copernicano del siglo XVI. En principio, este resultado nada tiene de absurdo, pues durante los siglos XVI y XVII no existía ningún medio directo para determinar las distancias desde la tierra a la esfera estelar. Su radio quizá fuera superior a 1.500.000 radios terrestres, pero con sólo unas dimensiones de este orden —y eran las que exigía el copernicanismo— cabía admitir la materialización de una ruptura real con la cosmología tradicional. Por ejemplo, Al Fargani había valorado el radio de la esfera de las estrellas en 20.110 radios terrestres; es decir, cifra más de 75 veces inferior a la estimación copernicana. El universo copernicano debe ser considerablemente más vasto que el de la cosmología tradicional. Su volumen es *como mínimo* 400.000 veces mayor; existe un espacio inmensamente grande entre la esfera de Saturno y la esfera estelar. En consecuencia, si bien Copérnico parece ignorar por completo la ruptura acaecida, la simplicidad y la coherencia funcionales de las envolturas esféricas del universo tradicional se han venido abajo.

La astronomía copernicana. El sol

El razonamiento esgrimido por Copérnico permite aceptar la existencia de un movimiento orbital terrestre en el seno de un universo de vastas dimensiones, pero esta posibilidad queda restringida a un nivel académico a menos que se pueda demostrar la compatibilidad entre dicho movimiento orbital y los movimientos del sol y los restantes planetas. Copérnico dedica precisamente los capítulos décimo y undécimo de su Libro Primero al estudio de estos movimientos. El mejor punto de arranque para nuestra discusión puede ser parafrasear con amplitud el contenido del capítulo undécimo, donde Copérnico describe el movimiento orbital de la tierra y considera sus efectos sobre el movimiento aparente del sol. Admitamos provisionalmente que, tal como se representa en la figura 28, los centros del universo, del sol y de la órbita terrestre coinciden en un mismo punto. En

este diagrama el plano de la eclíptica es visto desde una posición próxima al polo norte celeste; la tierra se desplaza con regularidad hacia el este a lo largo de su órbita y completa su revolución en un año, mientras que simultáneamente efectúa un giro completo alrededor de su eje, también en dirección este, cada 23 horas 56 minutos. A condición de que la órbita de la tierra sea mucho más pequeña que la esfera de las estrellas, la rotación axial de la tierra puede explicar con toda exactitud las trayectorias cotidianas del sol, la luna, los planetas y las estrellas, ya que desde cualquier punto de la órbita terrestre todos los cuerpos indicados deben verse sobre el fondo de la esfera estelar y parecer que se mueven con ella cuando la tierra gira sobre sí misma.

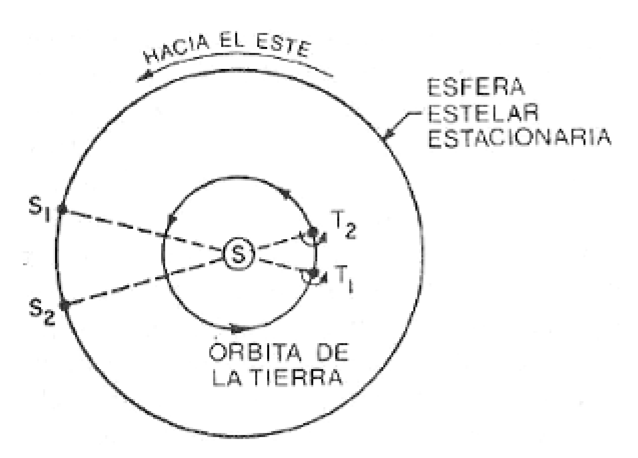


FIGURA 28. — Cuando la tierra se desplaza de T_1 a T_2 a lo largo de su órbita copernicana, la posición aparente del sol sobre la esfera de las estrellas pasa de S_1 a S_2.

En el presente diagrama la tierra aparece en dos posiciones orbitales que ocupa con un intervalo de treinta días. En una y otra las posiciones aparentes del sol sobre el fondo de la esfera de las estrellas deben estar situadas sobre la eclíptica, definida ahora como la línea de intersección entre la esfera de las estrellas y el plano sobre el que tiene lugar el movimiento de la tierra (plano que contiene al sol). Cuando la tierra se desplaza en dirección este desde la posición T_1 a la T_2, el sol se traslada aparentemente a lo largo de la eclíptica también en dirección este y desde la posición S_1 a la posición S_2. Así pues, la teoría de Copérnico prevé exactamente el mismo movimiento anual del sol en dirección este sobre la

eclíptica que el de la teoría de Ptolomeo. También prevé, como veremos de inmediato, idéntica variación estacional de la altura alcanzada por el sol en el cielo.

La figura 29 nos muestra la órbita terrestre vista desde un punto de la esfera celeste situado ligeramente al norte del equinoccio de otoño. La tierra aparece en las cuatro posiciones que ocupa sucesivamente en el equinoccio de primavera, el solsticio de verano, el equinoccio de otoño y el solsticio de invierno. En dichos puntos, lo mismo que a lo largo de todo su recorrido, el eje terrestre se mantiene constantemente paralelo a una linea imaginaria que atraviesa el sol y forma un ángulo de 23° y medio con la perpendicular al plano de la eclíptica. Las dos pequeñas flechas que aparecen en el diagrama nos indican las respectivas posiciones de un observador terrestre que se encuentra sobre latitudes boreales medias en los mediodías, hora local, del 22 de junio y el 22 de diciembre, los dos solsticios. Semirrectas que unan el sol con la tierra (no dibujadas en el diagrama) pueden indicar la dirección de los rayos solares al mediodía, claramente más próxima al cénit del observador en el solsticio de verano que en el solsticio de invierno. Una construcción similar nos determinará la altitud del sol en los equinoccios y en las épocas intermedias.

Así pues, la variación estacional de la altitud solar puede ser completamente diagnosticada a partir de la figura 29. Sin embargo, en la práctica, es más simple recurrir de nuevo a la explicación ptolemaica. Puesto que tanto en el sistema ptolemaico como en el copernicano el sol parece ocupar en todas y cada una de las estaciones la misma posición sobre la esfera estelar, en ambos sistemas debe salir y ponerse en compañía de las mismas estrellas. La correlación entre las estaciones y la posición aparente del sol sobre la eclíptica no puede verse afectada por el paso de un sistema a otro. Ambos sistemas son equivalentes con respecto a los movimientos aparentes del sol y las estrellas, y el ptolemaico es el más simple de los dos.

Este último diagrama también revela otras dos propiedades muy interesantes del sistema de Copérnico. Ya que es la rotación terrestre la que produce los círculos cotidianos de las estrellas, el eje de la tierra debería estar dirigido hacia el centro de tales círculos sobre la esfera celeste. Sin

embargo, tal como pone de manifiesto el diagrama, el eje terrestre jamás apunta hacia un mismo lugar de la esfera celeste desde el principio al final del año. Según la teoría copernicana, la prolongación del eje terrestre dibuja a lo largo del año dos pequeños círculos sobre la esfera de las estrellas, uno de ellos alrededor del polo norte celeste y el otro alrededor del polo sur celeste. Para un observador terrestre, el propio centro de los círculos diarios de las estrellas debiera aparecer en movimiento a lo largo de un pequeño círculo centrado en el polo celeste, empleando un año para completar su revolución al mismo. Dicho en términos más estrictamente observacionales, todas y cada una de las estrellas deberían mostrar un ligero cambio en su posición sobre la esfera estelar (o con respecto al polo observado de la misma) con el transcurso del tiempo.

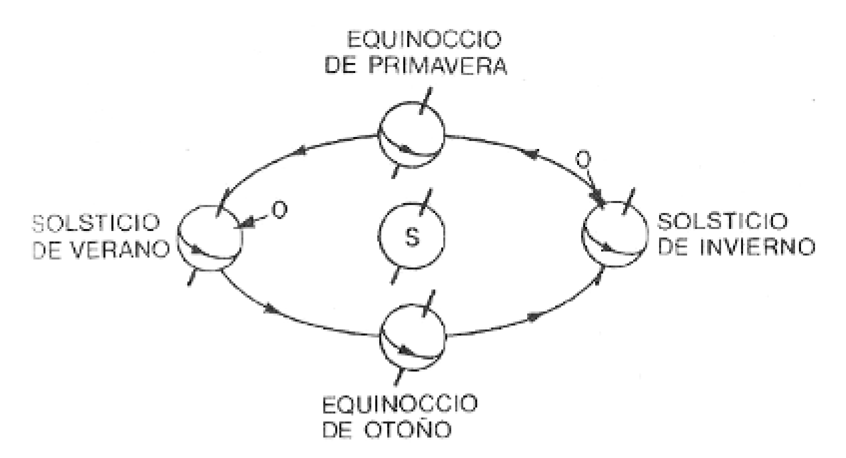


FIGURA 29. — Movimiento anual de la tierra sobre su órbita copernicana. El eje terrestre permanece constantemente paralelo a si mismo o a la recta fija que atraviesa el sol. En consecuencia, un observador *O* que al mediodía esté situado en latitudes boreales medias ve al sol mucho más alto en el cielo en el solsticio de verano que en el solsticio de invierno.

Este movimiento aparente, inobservable a simple vista y que incluso los telescopios no detectaron hasta 1838, recibe el nombre de movimiento paraláctico. Puesto que dos semirrectas que unan con una misma estrella dos puntos diametralmente opuestos de la órbita terrestre no son absolutamente paralelas (figura 30), la posición angular aparente de la estrella detectada desde la tierra debería cambiar con el transcurso del tiempo. Pero si la distancia a la estrella es mucho más grande que el diámetro de la órbita terrestre, el ángulo de paralaje, α en la figura 30, será

extremadamente pequeño, por lo que no existirá cambio apreciable en la posición aparente de la estrella. El movimiento paraláctico no es observable única y exclusivamente porque las estrellas se hallan muy alejadas de nosotros si comparamos tales distancias con las dimensiones de la órbita terrestre. La situación es completamente equivalente a la detectada en páginas anteriores al examinar los motivos por los que el movimiento de la tierra no parece modificar la intersección del plano del horizonte con la esfera estelar. De hecho, nos enfrentamos con el mismo problema. Sin embargo, esta segunda formulación es mucho más importante dada la extrema dificultad que existe en las proximidades del horizonte para efectuar las precisas mediciones de las posiciones estelares que necesitamos para saber si el horizonte divide o no a la esfera de las estrellas en dos partes iguales. Al contrario de lo que sucedía con la aparición y desaparición de los equinoccios, la búsqueda de los movimientos paralácticos no tiene por qué verse limitada a una observación del horizonte. Por consiguiente, el paralaje es un medio de control observacional de las dimensiones mínimas de la esfera de las estrellas condicionadas por las de la órbita terrestre mucho más sensible que el suministrado por la posición del horizonte; así pues, las estimaciones copernicanas del tamaño de la esfera estelar que acaban de citarse han debido de tener su origen en una discusión sobre el paralaje.

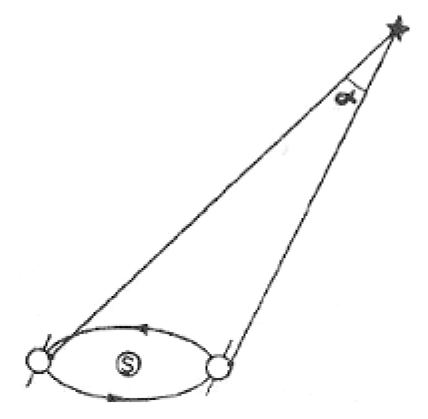


FIGURA 30. — Paralaje anual de una estrella. La línea que une la visual de un observador terrestre con una estrella fija no permanece paralela a si misma mientras la tierra va recorriendo su órbita. La posición aparente de la estrella sobre la esfera estelar se desplazará un ángulo α durante un intervalo temporal de seis meses.

El segundo punto que se desprende de una observación del esquema ofrecido en la figura 29 nada tiene que ver con el cielo, sino con Copérnico. Hemos descrito el movimiento orbital ilustrado por dicho diagrama como un movimiento simple en el que el centro de la tierra es arrastrado alrededor del sol a lo largo de un círculo mientras que su eje permanece constantemente paralelo a una línea fija que atraviesa el sol. Copérnico describe este mismo movimiento físico como el resultante de dos movimientos matemáticos simultáneos. Ésta es la razón por la que atribuye un total de tres movimientos circulares a la tierra. Aquí también, las argumentaciones que emplea en su descripción nos ofrecen otro significativo ejemplo de hasta qué punto su pensamiento se hallaba vinculado con las estructuras tradicionales del aristotelismo. Para Copérnico, la tierra es un planeta transportado alrededor del sol central por una esfera exactamente similar a la que hasta entonces se había usado para arrastrar el sol alrededor de la tierra. En el supuesto de que la tierra estuviera fijada sólidamente a una esfera, su eje no podría permanecer constantemente paralelo a la línea que atraviesa el sol, sino que la rotación de aquella la llevaría a ocupar las diferentes posiciones que se muestran en la figura 31*a*. Después de un giro de 180° alrededor del sol, el eje terrestre seguiría manteniendo una inclinación de 23° y medio con respecto a la perpendicular al plano de la eclíptica, aunque ahora en una dirección simétrica de la que tenía al iniciar el recorrido. Para anular dicho cambio en la dirección del eje provocado por la rotación de la esfera que arrastra a la tierra, Copérnico necesita introducir un tercer movimiento circular, aplicándolo esta vez al eje terrestre de forma exclusiva. La figura 31*b* nos muestra una representación esquemática de este tercer movimiento, un movimiento cónico que hace girar el extremo norte del eje una revolución anual hacia el oeste con el fin de compensar exactamente los efectos del movimiento orbital sobre el eje terrestre.

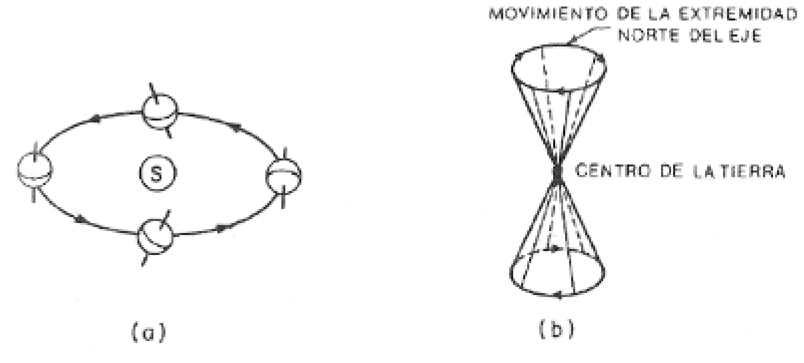


FIGURA 31. — El “segundo” y el “tercer” movimientos de Copérnico. El diagrama (*a*) nos muestra el segundo movimiento copernicano, el de un planeta fijado a una esfera en rotación con centro en el sol. Este movimiento no mantiene el eje terrestre paralelo a si mismo, de tal forma que se hace necesario recurrir a un tercer movimiento cónico (*b*) que obligue al eje a mantenerse en la dirección adecuada.

La astronomía copernicana. Los planetas

Hasta aquí, el esquema conceptual desarrollado por Copérnico es tan eficaz como el de Ptolomeo. No hay duda alguna de que no le supera, mientras que por otra parte parece muchísimo más difícil de manejar. Las auténticas bases innovadoras sólo aparecen en el universo de Copérnico con la introducción de los planetas. Consideremos, por ejemplo, la explicación del movimiento retrógrado a la que aludía Copérnico, sin discutirla, en la parte final del capítulo quinto del Libro Primero. En el sistema ptolemaico, la retrogradación de cada planeta se explica situando éste sobre un epiciclo mayor cuyo centro es arrastrado alrededor de la tierra por el deferente del planeta. El movimiento combinado de estos dos círculos produce en las trayectorias planetarias los característicos bucles que hemos examinado en el capítulo 3. Por su parte, el sistema copernicano no precisa epiciclos mayores. El movimiento retrógrado de un planeta a través de las estrellas, o movimiento hacia el oeste, sólo es aparente y está producido, lo mismo que el movimiento aparente del sol a lo largo de la eclíptica, por el movimiento orbital de la tierra. Según Copérnico, el movimiento que Ptolomeo había explicado con la ayuda de epiciclos mayores era de hecho el de la tierra,

atribuido por el observador a los planetas a causa de su creencia en la propia inmovilidad.

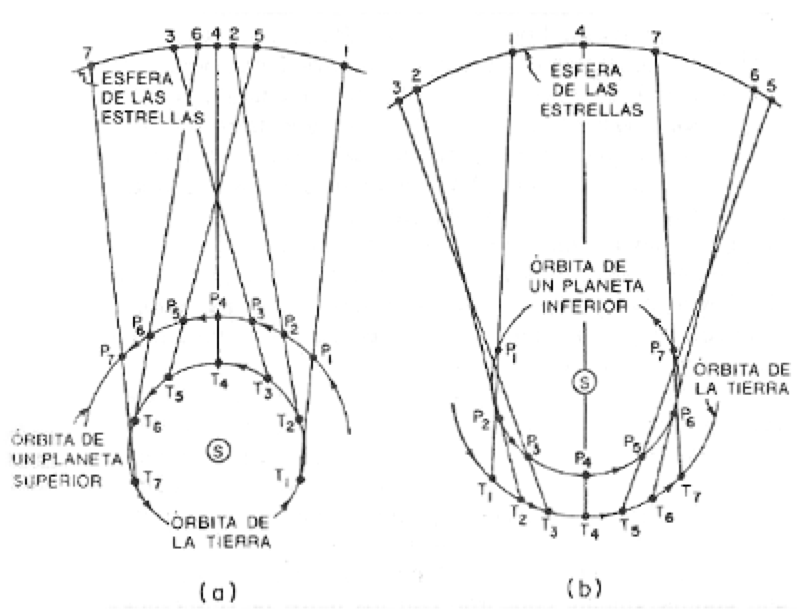


FIGURA 32. — Explicación copernicana de los movimientos de retrogradación de los planetas superiores (*a*) y los planetas inferiores (*b*). En cada uno de ambos diagramas, la tierra está animada de un movimiento uniforme sobre su órbita que la lleva de T_1 a T_7 mientras el planeta se traslada de P_1 a P_7. Simultáneamente, la posición aparente del planeta se proyecta sobre la esfera de las estrellas deslizándose de la posición 1 a la 7 en dirección este, pero en el momento en que el planeta avanza a la tierra o es avanzado por ésta se produce un breve movimiento retrógrado desde la posición 3 a la posición 5.

El punto en que se centran las desavenencias entre Copérnico y la teoría ptolemaica queda ilustrado y clarificado por las figuras 32*a* y 32*b*. En el primer diagrama, se muestran en proyección sobre el fondo fijo de la esfera estelar sucesivas posiciones aparentes de un planeta superior en movimiento vistas desde una tierra móvil. El segundo esquema nos muestra sucesivas posiciones aparentes de un planeta inferior. Tanto en uno como en otro caso sólo se han indicado los movimientos orbitales; se ha prescindido de la rotación diaria de la tierra, que es la que produce el rápido movimiento aparente hacia el oeste del sol, los planetas y las estrellas. Las sucesivas posiciones de la tierra sobre su órbita circular centrada en el sol se han designado en ambos diagramas por los puntos T_1, T_2, …, T_7 y las correspondientes posiciones sucesivas del planeta por P_1, P_2, …, P_7; las

correspondientes posiciones aparentes del planeta, que se obtienen prolongando hasta cortar la esfera de las estrellas una línea que una la tierra con el planeta, vienen designadas por 1, 2, …, 7. El examen de los diagramas muestra que el movimiento aparente del planeta a través de las estrellas es normal (hacia el este) de 1 a 2 y de 2 a 3; a continuación el planeta retrograda (hacia el oeste) de 3 a 4 y de 4 a 5; finalmente, invierte de nuevo la dirección de su movimiento y se desplaza con normalidad de 5 a 6 y de 6 a 7. Cuando la tierra completa su giro orbital, el planeta prosigue su movimiento normal hacia el este, desplazándose con mayor rapidez cuando se encuentra en posición diametralmente opuesta a la tierra con respecto al sol.

Así pues, en el sistema de Copérnico, los planetas observados desde la tierra parecerán moverse hacia el este durante la mayor parte del tiempo; sólo retrogradan cuando la tierra, en su movimiento orbital más rápido, los sobrepasa (planetas superiores) o cuando son ellos los que sobrepasan a la tierra (planetas inferiores). El movimiento retrógrado sólo puede producirse cuando la tierra ocupa su posición más próxima con respecto al planeta cuyo movimiento se estudia, hecho completamente concorde con los datos de observación.

Los planetas superiores alcanzan su brillo más intenso cuando se mueven hacia el oeste. Así pues, queda explicada sin utilización de epiciclos, al menos cualitativamente, la primera gran irregularidad del movimiento planetario.

La figura 33 nos muestra cómo se explica mediante la tesis copernicana una segunda irregularidad del movimiento planetario: la desigualdad en los tiempos requeridos por un planeta para completar recorridos sucesivos a lo largo de la eclíptica. Se ha supuesto en el diagrama que la tierra completa una órbita y cuarto en dirección este mientras el planeta, en este caso un planeta superior, efectúa una sola vuelta completa, también en dirección este, a lo largo de su órbita. Supongamos que al iniciar la serie de observaciones la tierra está situada en T_1 y el planeta en P. En este momento preciso el planeta se encuentra en medio de una retrogradación, proyectándose sobre el punto 1 en la esfera estelar inmóvil. Cuando el

planeta ha completado una revolución sobre su órbita y ocupa de nuevo la posición *P*, la tierra ha dado una vuelta y cuarto sobre la suya, por lo que ahora estará situada en T_2. En consecuencia, el planeta parece hallarse en 2, es decir, al oeste del punto 1 del que había partido. El planeta aún no ha completado una vuelta a lo largo de la eclíptica, y el hacerlo le llevará un tiempo superior al que necesita para efectuar una revolución sobre su órbita.

Cuando el planeta lleva a cabo una segunda vuelta sobre su órbita, la tierra completa una vez más un trayecto superior a una revolución orbital, alcanzando el punto T_3 cuando el planeta vuelve a ocupar la posición *P*. Esta vez, el planeta se proyecta en 3, punto situado al este del 2. Así pues, ha dado más de una vuelta alrededor de la eclíptica mientras que sólo ha completado una revolución orbital, siendo esta segunda vuelta alrededor de la eclíptica extraordinariamente rápida. Al final de una tercera revolución, el planeta vuelve a encontrarse en *P*, pero ahora aparece proyectado en el punto 4, situado al este del 3, con lo que también puede afirmarse que su recorrido a lo largo de la eclíptica ha seguido siendo rápido. Después de una cuarta revolución orbital, el planeta reaparece en 1, punto situado al oeste de 4; así pues, esta última vuelta habrá sido lenta. Vemos por consiguiente que el planeta emplea el mismo tiempo para completar cuatro revoluciones sobre su órbita que para recorrer cuatro veces la eclíptica, con lo que el tiempo medio requerido por un planeta superior para recorrer la eclíptica será idéntico a su período orbital mientras que el tiempo requerido para una vuelta en particular podrá ser muy superior o muy inferior al promedio. Un razonamiento análogo nos explicaría las irregularidades similares observadas en el movimiento de un planeta inferior.

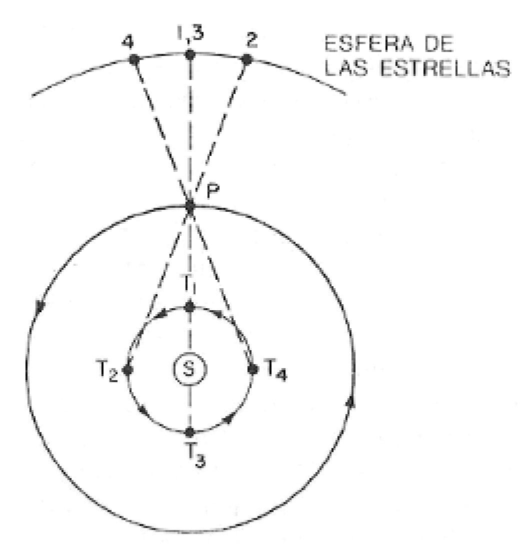


FIGURA 33. — Explicación copernicana de las variaciones del tiempo empleado por un planeta superior para completar sucesivos recorridos de la eclíptica. Mientras el planeta da una revolución completa sobre su órbita, trasladándose de *P* a *P*, la tierra da 1¼ de revoluciones, de T_1 a T_2, después de haber pasado nuevamente por T_1. Durante este intervalo de tiempo la posición aparente del planeta sobre la esfera estelar se desplaza en dirección este de 1 a 2, lo que equivale a algo menos de una vuelta completa. En la siguiente revolución la tierra se desplaza desde T_2 a T_3, después de haber pasado por T_2, mientras que la posición aparente del planeta sobre la esfera estelar pasa de 2 a 1, después de haber pasado ya una vez por 1, lo que equivale a algo más de una vuelta completa a lo largo de la eclíptica.

El movimiento retrógrado y la variación del tiempo empleado en recorrer la eclíptica constituyen las dos irregularidades planetarias de primer orden que, en la antigüedad, habían impulsado a los astrónomos a emplear epiciclos y deferentes para tratar el problema de los planetas. El sistema de Copérnico explica estas mismas grandes irregularidades sin recurrir a los epiciclos, o al menos a los epiciclos mayores. Para explicar aunque sólo de forma aproximada y cualitativa los movimientos planetarios, tanto Hiparco como Ptolomeo habían empleado doce círculos: uno para el sol, uno para la luna y dos para cada uno de los cinco “astros errantes” restantes. Copérnico consiguió ofrecer una misma explicación cualitativa de los movimientos planetarios aparentes con sólo siete círculos. Le bastó con emplear un sólo círculo centrado en el sol para cada uno de los seis planetas conocidos —Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno— y un círculo suplementario, con centro en la tierra, para la luna. En consecuencia, para un astrónomo exclusivamente interesado en obtener

una explicación cualitativa de los movimientos planetarios, el sistema de Copérnico debió parecerle el más económico de ambos.

Sin embargo, esta aparente economía del sistema copernicano, aunque sea una victoria propagandística que los partidarios de la nueva astronomía raramente dejan de subrayar, es en gran parte ilusoria. No hemos empezado aún a tratar de la astronomía planetaria de Copérnico en toda su complejidad. El sistema de los siete círculos presentado en el Libro Primero del *De revolutionibus*, y en buena parte de las modernas exposiciones elementales del sistema copernicano, es un sistema maravillosamente económico, pero no funciona. No permite predecir la posición de los planetas con una precisión comparable a la que ofrece el sistema de Ptolomeo. Su precisión puede compararse a la de una versión simplificada del sistema ptolemaico de los doce círculos. Puede afirmarse, pues, que Copérnico ofrece una explicación *cualitativa* de los movimientos planetarios más económica que la de Ptolomeo. Sin embargo, para alcanzar una buena explicación *cuantitativa* de la alteración de las posiciones de los planetas, Ptolomeo se había visto obligado a complicar su sistema básico de los doce círculos con epiciclos menores, excéntricas y ecuantes, mientras que Copérnico, para obtener resultados comparables a partir de su sistema básico de los siete círculos, tuvo que hacer lo propio empleando epiciclos menores y excéntricas. Así pues, su sistema completo apenas era menos engorroso que el ptolemaico. Uno y otro empleaban más de treinta círculos; desde el punto de vista de la economía había muy poco margen de elección. Tampoco puede afirmarse que ambos sistemas se diferenciaran en cuanto a su precisión. Una vez Copérnico acabó de añadir círculos complementarios, su complicado sistema con centro en el sol dio resultados tan precisos, pero no más, que los de Ptolomeo. Copérnico no había resuelto el problema de los planetas.

La descripción completa del sistema copernicano aparece en los últimos libros del *De revolutionibus*. Por suerte, nos basta con ilustrar el tipo de complejas cuestiones que en ellos se exponen. Así, por ejemplo, el sistema de Copérnico no estaba absolutamente centrado en el sol. Para explicar el ritmo acelerado con que el sol atraviesa los signos del zodíaco durante el

invierno, Copérnico desplazó del sol el centro de la órbita terrestre, convirtiéndola en excéntrica. Para explicar otras irregularidades detectadas en observaciones antiguas y contemporáneas del movimiento solar, Copérnico decidió mantener en movimiento este centro desplazado. Para ello colocó el centro de la excéntrica terrestre sobre un segundo círculo cuyo movimiento modificaba constantemente la magnitud y la dirección de la excentricidad. El sistema que finalmente utilizó para calcular el movimiento de la tierra es muy aproximado al que se representa en la figura 34*a*. En este diagrama, *S* representa el sol, inmóvil en el espacio; el punto *O*, que se mueve lentamente alrededor del sol, es el centro de un círculo que, a su vez, también gira con lentitud sobre sí mismo transportando el centro móvil O_T de la excéntrica de la tierra; *T* es la tierra.

Complicaciones análogas eran introducidas para explicar los movimientos observados de otros cuerpos celestes. Para la luna, Copérnico se sirvió de un total de tres círculos; el primero tenía por centro la tierra en movimiento, el segundo estaba centrado sobre la circunferencia móvil del primero y el tercero sobre la circunferencia del segundo. Para Marte y gran parte de los demás planetas, empleó un sistema muy semejante al representado en la figura 34*b*. El centro de la órbita de Marte, O_M, está desplazado del centro de la órbita terrestre, O_T, y se mueve con él; el propio planeta está situado en *M*, es decir, no sobre la excéntrica, sino sobre un epiciclo que gira hacia el este la misma dirección y con el mismo período que aquélla. La complicación no finaliza con cuanto acabamos de indicar. Copérnico necesitaba aún toda una serie de dispositivos equivalentes a los empleados por Ptolomeo para explicar las desviaciones planetarias hacia el norte y el sur de la eclíptica.

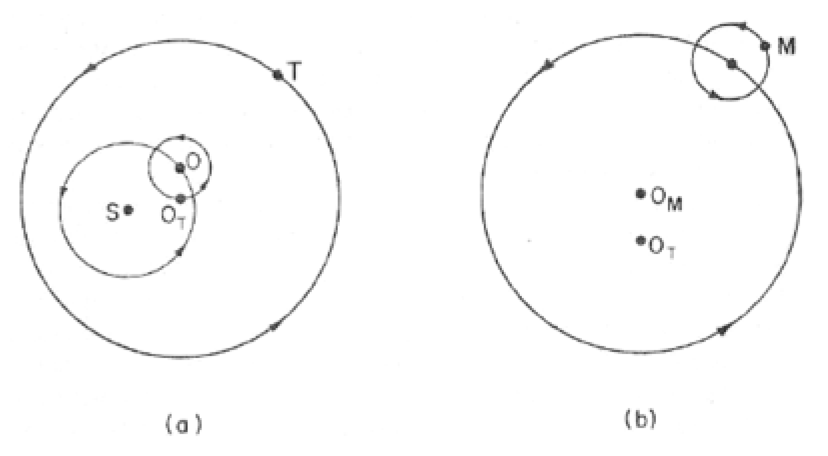


FIGURA 34. — Explicación copernicana de los movimientos de la tierra (*a*) y Marte (*b*). En el esquema (*a*) el sol está situado en *S* y la tierra, *T* se mueve sobre un círculo cuyo centro, O_T, gira lentamente alrededor del punto *O*, que a su vez se traslada a lo largo de un círculo centrado en el sol. En el esquema (*b*) Marte esta situado sobre un epiciclo que gira sobre un deferente cuyo centro, O_M, mantiene una relación geométrica fija con respecto al centro móvil O_T de la órbita terrestre.

Este esbozo del complejo engranaje de círculos empleados por Copérnico para calcular las posiciones de los planetas muestra, a pesar de su esquematismo, la tercera gran incongruencia del *De revolutionibus* y la inmensa ironía de la obra a la que el gran astrónomo dedicó toda su vida. El prefacio del *De revolutionibus* se inicia con una violenta diatriba contra la astronomía ptolemaica por su imprecisión, complejidad e incoherencia. Sin embargo, antes de concluir, el texto de Copérnico ya se hacía reo de idénticas debilidades. El sistema de Copérnico no es ni más simple ni más preciso que el de Ptolomeo, y los métodos empleados por Copérnico para elaborarlo parecen ser tan poco aptos como los ptolemaicos para aportar una solución global y coherente al problema de los planetas. El propio *De revolutionibus* no está en consonancia con la única versión primitiva del sistema que ha llegado hasta nuestras manos, la ofrecida por Copérnico en el primitivo manuscrito del *Commentariolus*. Cabe indicar que Copérnico jamás pudo deducir de sus hipótesis una combinación de círculos que fuese única, y que tampoco lo consiguieron sus sucesores. Así pues, los rasgos heredados de la antigua tradición que habían provocado el intento copernicano de poner en marcha una innovación radical jamás fueron eliminados por la obra del gran astrónomo. Copérnico había rechazado la tradición ptolemaica porque descubrió “que no existe acuerdo entre las

investigaciones [astronómicas] de los diferentes matemáticos” y porque “en el supuesto de que las hipótesis admitidas no fueran falaces, todo cuanto pudiera inferirse de ellas podría ser verificado sin lugar a dudas”. Un nuevo Copérnico habría podido emplear contra él idénticos argumentos.

La armonía del sistema copernicano

Desde un punto de vista estrictamente práctico, el nuevo sistema planetario de Copérnico fue un fracaso; no era ni más preciso ni mucho más simple que el de sus predecesores ptolemaicos. Sin embargo, desde un punto de vista histórico, el nuevo sistema gozó de un enorme éxito. El *De revolutionibus* convenció a algunos de los sucesores de Copérnico de que la astronomía heliocéntrica detentaba la clave del problema de los planetas, y ellos fueron quienes finalmente proporcionaron la solución simple y precisa que Copérnico había andado buscando. Estudiaremos sus trabajos en el siguiente capítulo, pero previamente debemos intentar descubrir las razones que les inclinaron en favor del copernicanismo a pesar de no obtener ninguna ventaja con la nueva teoría por lo que respectaba a precisión y economía. ¿Por qué decidieron intercambiar las posiciones de la tierra y el sol? Es difícil aislar la respuesta a esta pregunta de una serie de detalles técnicos esparcidos aquí y allá a lo largo del *De revolutionibus*, pues el propio Copérnico reconocía que el auténtico atractivo de una astronomía heliocéntrica era más de orden estético que pragmático. Para los astrónomos, la elección inicial entre el sistema de Copérnico y el de Ptolomeo podía ser simplemente una cuestión de gusto, y tales materias son las más difíciles de definir o discutir. No obstante, tal como muestra la historia de la propia revolución copernicana, las cuestiones de gusto no son en absoluto despreciables. El oído preparado para discernir la armonía geométrica era capaz de detectar una simplicidad y coherencia nuevas en la astronomía heliocéntrica de Copérnico que, de no ser percibidas, no habrían dado nacimiento a una revolución.

Ya hemos examinado una de las ventajas estéticas del sistema de Copérnico, a saber, su capacidad para explicar los principales rasgos *cualitativos* del movimiento planetario sin recurrir a los epiciclos. En particular, el movimiento retrógrado se convierte en una consecuencia natural e inmediata de la geometría de las órbitas centradas en el sol. Pero sólo los astrónomos que adjudicaban a la simplicidad cualitativa una importancia mayor que a la precisión cuantitativa (y fueron bien pocos, entre ellos Galileo) podían considerar que tal argumento era convincente ante el complejo sistema de epiciclos y excéntricas elaborado en el *De revolutionibus*. Por suerte, había otras razones menos efímeras en favor del nuevo sistema. Así, por ejemplo, Copérnico explicaba los movimientos de los planetas inferiores de forma más simple y natural que Ptolomeo. Mercurio y Venus jamás se alejaban demasiado del sol, y la astronomía ptolemaica explica esta observación vinculando los deferentes de ambos al del sol, de tal forma que el centro del epiciclo de cada planeta inferior permanezca constantemente sobre una recta que pase por la tierra y el sol (figura 35*a*). Esta alineación de los centros de los epiciclos es un dispositivo "extra", una adición *ad hoc* a la geometría de la astronomía geocéntrica, mientras que en el sistema copernicano no hay necesidad alguna de mantener tal hipótesis. Cuando la órbita de un planeta se encuentra completamente dentro de la terrestre, tal como se indica en la figura 35*b*, el planeta no puede hallarse demasiado lejos del sol en ninguno de los puntos de su trayectoria. La elongación máxima se producirá cuando, como aparece en la figura, la recta que une la tierra con el planeta es tangente a la órbita de éste y el ángulo *SPT* es recto. Así pues, el ángulo de elongación, *STP*, es el mayor ángulo en que un planeta inferior puede desviarse del sol. La geometría sobre la que se basa el sistema de Copérnico puede explicar perfectamente la forma en que están vinculados Mercurio, Venus y el sol.

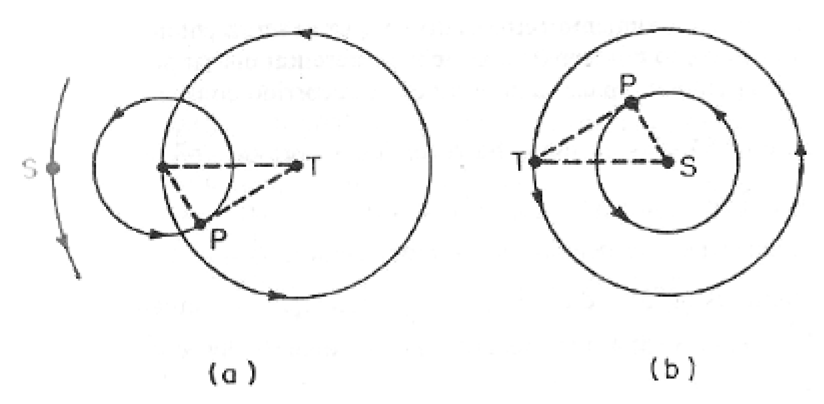


FIGURA 35. — Explicación de la elongación límite de los planetas inferiores en el sistema de Ptolomeo (*a*) y en el sistema de Copérnico (*b*.) En el sistema ptolemaico es necesario limitar arbitrariamente el ángulo entre el sol *S* y el planeta *P* manteniendo el centro del epiciclo sobre la recta que une la tierra con el sol. En el sistema copernicano no es necesario imponer tal restricción porque la órbita del planeta se halla contenida por completo en la de la tierra.

La geometría copernicana aclara otro aspecto aún más importante del comportamiento de los planetas inferiores: el orden en que están dispuestas sus respectivas órbitas. En el sistema de Ptolomeo, los planetas estaban situados sobre órbitas concéntricas a la tierra de forma en que la distancia media de un planeta a la tierra era tanto mayor cuanto más largo era el tiempo empleado por éste para recorrer la eclíptica. Este mecanismo se ajustaba perfectamente a lo observado para los planetas superiores y la luna, pero Mercurio, Venus y el sol precisaban por término medio un año para recorrer la eclíptica, por lo que la disposición relativa que ocupaban sus órbitas siempre había sido una fuente de discusiones. El sistema copernicano no da pie a tales controversias; no hay dos planetas que posean idéntico periodo orbital. De un lado, la luna queda al margen puesto que se mueve alrededor de la tierra y no del sol. Los planetas superiores, Marte, Júpiter y Saturno, mantienen su primitivo orden alrededor del nuevo centro pues sus períodos orbitales son iguales a los tiempos medios que emplean para circunvalar la eclíptica. La órbita de la tierra se encuentra en el interior de la de Marte, pues el período orbital terrestre, un año, es inferior al de Marte, 687 días. Sólo nos falta colorar a Mercurio y Venus en el sistema, y su situación relativa quedará, por primera vez, determinada de manera única.

Veámoslo. Se sabe que Venus retrograda cada 584 días, y puesto que dicho movimiento retrógrado sólo se observa cuando adelanta a la tierra, dicho número de días debe representar el tiempo que necesita Venus para sobrepasar a la tierra en su recorrido común alrededor del sol. En 584 días, la tierra ha recorrido su órbita 584/365 (= 1 $^{219}/_{365}$) veces. Puesto que Venus ha sobrepasado a la tierra una vez durante este intervalo, ha debido recorrer su órbita 2 $^{219}/_{365}$ (= 949/365) veces durante estos 584 días. Pero un planeta que circunvala su órbita 949/365 veces en 584 días, necesitará exactamente 584 × 365/949 (= 225) días para dar una revolución completa a lo largo de la misma. Por consiguiente, dado que el período de Venus, 225 días, es inferior al de la tierra, su órbita, sin ambigüedad de ningún tipo, deberá estar situada dentro de la órbita terrestre. Un cálculo similar nos sitúa la órbita de Mercurio dentro de la de Venus, convirtiéndole en el planeta más próximo al sol. Mercurio retrograda, y por tanto adelanta a la tierra, cada 116 días. Por consiguiente, debe recorrer su órbita exactamente 1 $^{116}/_{365}$ (= 481/365) veces en 116 días. Para completar una revolución orbital empleará exactamente 116 × 365/481 (= 88) días. Dicho período orbital es el más corto de todos, por lo que Mercurio es el planeta más próximo al sol.

Hasta aquí, hemos venido ordenando las órbitas heliocéntricas de los planetas según el procedimiento empleado por los astrónomos ptolemaicos para distribuir las geocéntricas: los planetas más alejados del centro emplean más tiempo en efectuar sus recorridos orbitales. La hipótesis de que el tamaño de la órbita crece con el período orbital puede aplicarse de forma más completa al sistema copernicano que al sistema ptolemaico, pero en ambos casos se trata de un supuesto en principio arbitrario. Parece natural que los planetas tengan este comportamiento, idéntico al presentado por las hormigas de Vitrubio, aunque en modo alguno es necesario que así sea. Quizá la hipótesis es completamente gratuita y los planetas, excepción hecha del sol y de la luna, cuyas distancias a la tierra pueden ser determinadas directamente, estén ordenados de forma distinta.

La respuesta a esta sugerencia de reordenación constituye otra diferencia muy importante entre los sistemas copernicano y ptolemaico, y el

propio Copérnico, tal como hemos descubierto en su prefacio, insiste particularmente sobre este aspecto. En el sistema ptolemaico, el deferente y el epiciclo de cualquier planeta pueden ser reducidos o dilatados a voluntad sin afectar en nada las dimensiones orbitales de los restantes o la posición que el planeta en cuestión ocupa sobre el fondo de la esfera estelar observado desde una tierra central. *Puede* determinarse el orden de las órbitas suponiendo una relación entre sus dimensiones y los correspondientes períodos orbitales. Además, con la ayuda de la hipótesis suplementaria, discutida en el capítulo 3, de que la distancia mínima entre un planeta y la tierra es justamente igual a la distancia máxima entre la tierra y el planeta inmediatamente interior a la misma, se *pueden* atribuir también dimensiones relativas a las órbitas planetarias. Pero aunque ambas hipótesis parezcan naturales, ninguna de ellas es necesaria. El sistema ptolemaico podía predecir idénticas posiciones aparentes de los planetas prescindiendo de una y otra. En dicho sistema las apariencias no dependen ni del orden ni del tamaño de las órbitas planetarias.

Esta libertad no existe en el sistema copernicano. Si todos los planetas recorren órbitas aproximadamente circulares alrededor del sol, puede determinarse directamente, a partir de la observación, el orden y las dimensiones relativas de dichas órbitas sin recurrir para nada a suposiciones suplementarias. Cualquier cambio en el orden o incluso en las dimensiones relativas de las órbitas trastorna todo el sistema. Por ejemplo, la figura 36*a* nos muestra un planeta inferior *P* visto desde la tierra en el momento en que se halla más lejos del sol. Se ha supuesto que la órbita es circular. Por consiguiente, el ángulo *SPT* debe ser recto cuando el ángulo de elongación, *STP*, alcanza su valor máximo. Entonces el planeta, el sol y la tierra constituyen los vértices de un triángulo rectángulo del que puede medirse directamente uno de sus ángulos agudos, el *STP*. Pero si conocemos uno de los ángulos agudos en un triángulo rectángulo, podemos determinar la relación que existe entre las longitudes de sus lados. Así pues, nos es dado calcular la razón entre el radio *SP* de la órbita del planeta inferior y el radio *ST* de la órbita terrestre a partir del valor del ángulo *STP*. En otras palabras,

las dimensiones relativas de la órbita terrestre y de las órbitas de los dos planetas inferiores pueden ser deducidas a partir de la observación.

Es posible efectuar una determinación equivalente para cualquier planeta superior, aunque las técnicas implicadas sean mucho más complejas. La figura 36*b* nos ilustra uno de los procedimientos posibles. Supongamos que en un determinado instante el sol, la tierra y el planeta están alineados sobre la recta *STP*; en esta disposición, el planeta se halla diametralmente opuesto al sol sobre la eclíptica y en medio de una retrogradación. Puesto que la tierra recorre su órbita con mayor rapidez que cualquier planeta superior, habrá un instante posterior en el que la tierra, ahora en *T'* y el planeta, ahora en *P'* formarán un ángulo recto con el sol, *ST'P'*. El ángulo *ST'P'* que forman el sol y el planeta superior vistos desde la tierra se puede determinar directamente, lo mismo que el tiempo que emplea la tierra para trasladarse desde *T* hasta *T'*. Con tales datos ya puede calcularse el valor del ángulo *TST'*, pues debe estar en la misma razón con respecto a 360° que la existente entre el tiempo que emplea la tierra para ir de *T* a *T'* y la duración de su revolución orbital, es decir, 365 días. El ángulo *PSP'* puede determinarse siguiendo idéntico procedimiento, pues se conoce de antemano el tiempo que emplea el planeta en completar una revolución, y el que necesita para ir de *P* a *P'* es el mismo que el que necesita la tierra para trasladarse de *T* a *T'*. Conociendo *PSP'* y *TST'*, se determina el ángulo *P'ST'* mediante una simple sustracción. Tenemos, pues, nuevamente un triángulo rectángulo, *ST'P'*, del que conocemos un ángulo agudo, *P'ST'*, con lo que puede establecerse la relación entre el radio *SP'* de la órbita planetaria y el radio *ST'* de la órbita terrestre siguiendo el mismo proceso que hemos visto para el caso de un planeta inferior.

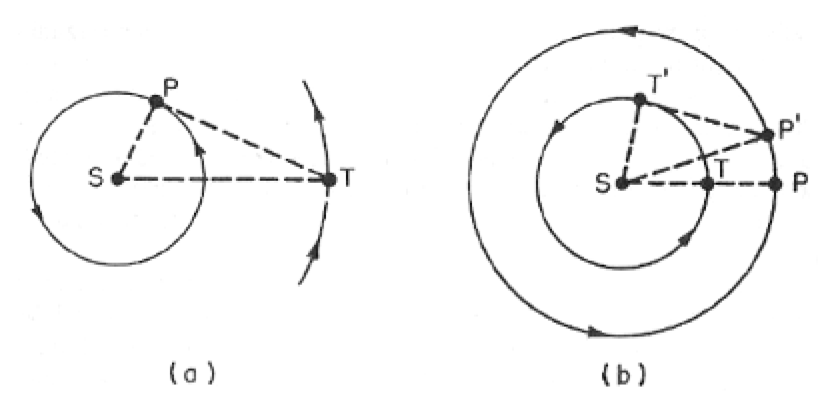


FIGURA 36. — Determinación de las dimensiones relativas de las órbitas de un planeta inferior (*a*) y de un planeta superior (*b*) en el sistema copernicano.

Con la ayuda de tales técnicas pueden determinarse las distancias de la tierra a todos y cada uno de los planetas en función de la distancia de aquella al sol o en función de cualquier otra unidad (por ejemplo el estadio, que es la unidad con la que ha sido medido el radio de la órbita terrestre). Ahora, por primera vez tal como dice Copérnico en su carta-prefacio, “podía deducirse [...] el orden y las dimensiones de todos los astros y orbes, apareciendo en el cielo una conexión tal que nada podía cambiarse en ninguna de sus partes sin que se siguiera una confusión de las restantes y del Universo entero”. La nueva astronomía presenta para Copérnico un carácter natural y una coherencia ausentes en la astronomía geocéntrica porque, ente otras razones, las dimensiones relativas de las órbitas de los planetas son una consecuencia directa de las primeras premisas geométricas de un sistema heliocéntrico. A partir del sistema de Copérnico puede deducirse la estructura del cielo con menos hipótesis extrañas o *ad hoc*, como por ejemplo la de la plenitud del universo. Es a la armonía estética y nueva a quien Copérnico sitúa en primer plano, aspecto que queda ilustrado de forma completísima en su décimo capítulo del Libro Primero del *De revolutionibus*. Una vez familiarizados con el nuevo sistema (situación en la que no se hallaban los lectores profanos de Copérnico) abordaremos de inmediato este capítulo para intentar comprender los propósitos del autor.

10. *Del orden de los orbes celestes*

No veo que nadie ponga en duda que el cielo de las estrellas fijas sea lo más alto de todo cuanto es visible. Por lo que respecta al orden de los planetas, vemos que los antiguos filósofos querían determinar a partir del tamaño de sus revoluciones, asumiendo que, tal como demuestra Euclides en su *Óptica*, de entre una serie de cuerpos con igual velocidad los que están más alejados de nosotros parecen ser arrastrados con mayor lentitud. Piensan, pues, que la luna efectúa su recorrido en el tiempo mis breve de todos porque, siendo la más cercana a la tierra, se ve arrastrada por el círculo más pequeño. Por el contrario, Saturno, que completa la más grande de las trayectorias con el mayor de los tiempos, es el que está más alejado. Debajo de él, Júpiter. A continuación, Marte. Sobre Mercurio y Venus encontramos opiniones diversas pues, a diferencia de los otros, no se alejan por completo del sol. Por tal razón se les sitúa por encima del sol en algunos casos, como en el *Timeo* de Platón, mientras que en otros se les coloca debajo, tal en las obras de Ptolomeo y de buena parte de las de los modernos. Alpetragio [astrónomo musulmán del siglo XII] coloca a Venus por debajo del sol y a Mercurio por encima de éste. Puesto que los seguidores de Platón creen que todos los planetas son cuerpos opacos que resplandecen por la luz recibida del sol, estiman que, dada la escasa distancia que les separa del mismo, si estuvieran situados por encima del sol se nos mostrarían como medios círculos, o en todo caso nunca como círculos completos. En efecto, de ordinario reflejarían la luz recibida hacia arriba, es decir, hacia el sol, de forma similar a cuanto observamos en la luna nueva o menguante. [Véase la discusión sobre las fases de Venus en el próximo capítulo. Ni este efecto ni el que expone a continuación pueden ser discernidos sin la ayuda del telescopio.] También afirman que algunas veces debería ser ocultado parcialmente por su interposición, con lo que la luz procedente del mismo disminuiría proporcionalmente al tamaño del planea interpuesto; pero como nunca observamos tal efecto, creen que en forma alguna pueden los planetas estar por debajo del sol […] [Copérnico expone entonces una serie de dificultades inherentes a los razonamientos habitualmente empleados para determinar el orden relativo de las órbitas del sol y de los planetas inferiores. Y continúa:]

Hasta qué punto es poco convincente la argumentación de Ptolomeo sobre la conveniencia de que el sol esté situado entre los [planetas] que se alejan en todos los sentidos y los que no se alejan [es decir, entre los planetas superiores que pueden presentar cualquier elongación y los planetas inferiores cuya elongación máxima está limitada] queda patente en el comportamiento de la luna, que se aleja en todos los sentidos, revelando así la falsedad de tal suposición. Quienes colocan a Venus, e inmediatamente después a Mercurio, por debajo del sol, o bien los disponen en cualquier otro orden, ¿qué causas invocarán para explicar, aun bajo el supuesto de que la relación entre las velocidades de los planetas no falsee el orden aceptado, que no siguen trayectorias independientes y distintas de la del sol [sus deferentes no están vinculados a los del sol] como hacen los demás planetas? Por consiguiente, o bien será preciso que la tierra deje de ser el centro al que está referido el orden de astros y orbes, o bien que pierda su razón de ser toda ordenación, que se ignore por qué Saturno ocupa la posición más elevada en lugar de hacerlo Júpiter o cualquier otro. Por tal motivo, creo que en modo alguno debemos despreciar arbitrariamente el sistema esbozado por Marciano Capela [un enciclopedista romano del siglo IV que recogió una teoría sobre los planetas inferiores probablemente debida a Heráclides] así como por otros latinos. Éstos estimaron que tanto Venus como Mercurio no giran alrededor de la tierra como los demás planetas, sino que siguen trayectorias con centro en el sol, razón por la cual sólo pueden alejarse de éste tanto como se lo permitan las convexidades de sus órbitas […]. ¿Qué otra cosa pueden querer indicar, sino que el centro de sus orbes está cerca del sol? De esta manera el orbe de Mercurio estará ciertamente inmerso en el de Venus, que debe ser más de dos veces mayor.

Si aprovechamos esta ocasión para extender la anterior hipótesis a Saturno, Júpiter y Marte, de tal modo que las dimensiones de sus órbitas sean tales que engloben las de la tierra, Venus y Mercurio […]. Los planetas exteriores alcanzan su posición más próxima a la tierra cuando salen al anochecer; es decir, cuando están en oposición con el sol (cuando la tierra está situada entre aquéllos y el sol); por el contrario, alcanzan su máxima elongación con respecto a la tierra cuando se ponen al anochecer [o lo que

es lo mismo], cuando están en conjunción con el sol, hallándose éste entre la tierra y los planetas. Tales hechos indican claramente que su centro de revolución depende más del sol que de la tierra, y que es el mismo al que se vinculan las circunvalaciones de Venus y Mercurio.

[En realidad, las observaciones de Copérnico no “prueban” nada. El sistema ptolemaico explica los fenómenos anteriores tan bien como pueda hacerlo el copernicano, pero, una vez más, este último da una explicación más natural de los hechos ya que hace depender la limitada elongación de los planetas inferiores solamente de la geometría de un sistema astronómico heliocéntrico, no de los períodos orbitales particulares asignados a los planetas. Las observaciones de Copérnico pueden quedar aclaradas examinando la figura 32*a*. Un planeta superior retrograda cuando es alcanzado por la tierra, y en tales condiciones debe ocupar la posición más próxima a la tierra a la vez que la opuesta al sol sobre la eclíptica. En el sistema de Ptolomeo un planeta superior que retrograda debe estar más cerca que nunca de la tierra y, de hecho, está al otro lado del cielo con respecto al sol. Tal posición se debe exclusivamente a que las velocidades de giro de su deferente y de su epiciclo tienen valores tales que sitúan al planeta en oposición con el sol cada vez que el epiciclo lo lleva a las proximidades de la tierra central. Si los períodos del epiciclo o del deferente variaran ligeramente, la regularidad cualitativa que coloca a un planeta superior que retrograda en oposición con el sol no existiría. En el sistema de Copérnico, este hecho se produce con independencia de los períodos particulares de los planetas sobre sus órbitas.]

Puesto qui todos [los planetas] poseen un mismo centro de revolución es necesario que el espacio que queda entre el lado convexo del orbe de Venus y el cóncavo del orbe de Marte forme un orbe o esfera, concéntrica con las demás y capaz de albergar la tierra con su compañera la luna y todo lo que está contenido bajo el globo lunar. En modo alguno podemos separar la tierra de la luna —indudablemente el cuerpo celeste más cercano a ella— y mucho menos cuando le encontramos una ubicación adecuada y suficientemente amplia en el seno de este espacio.

Así pues, afirmamos que el centro de la tierra, junto con todo cuanto engloba la esfera lunar, es arrastrado alrededor del sol por este gran orbe en una revolución anual, y que el centro del universo está muy cerca del centro del sol, y que permaneciendo inmóvil el sol, su movimiento aparente se explica en realidad por el movimiento de la tierra, y que las dimensiones del universo son tales que, si bien la distancia de la tierra al sol es considerable comparada con el tamaño de otros orbes planetarios, es insignificante en relación a las dimensiones de la esfera de las estrellas.

Creo más fácil admitir tales extremos que desorientar la razón con una multitud casi infinita de orbes, tal como se ven obligados a hacer los que sitúan la tierra en el centro del universo. Así pues, mejor será adecuarnos a la sagacidad de la naturaleza que, para no producir nada vano o superfluo, a menudo prefiere dotar a un mismo hecho de varios efectos. Aunque todo esto parezca difícil, casi impensable y contrario a la opinión comúnmente mantenida, intentaré, con la ayuda de Dios, hacerlo más claro que el día, al menos para quienes conocen las matemáticas.

Admitida esta primera ley —que nadie podría sustituir por otra más adecuada— de que la magnitud de los orbes es proporcional a los períodos de revolución, el orden de las esferas, comenzando por la más alejada, es el siguiente.

La primera y la más distante de todas es la esfera de las estrellas fijas, que todo lo contiene y que por tal razón es inmóvil. A ella vienen referidos el movimiento y la posición de todos los demás astros […]. Le sigue el primero de los planetas, Saturno, que completa su revolución en 30 años. Después de él, Júpiter, que tarda doce años en completarla. A continuación, Marte, que emplea dos años. El cuarto lugar en la serie lo ocupa la revolución anual del orbe terrestre, en el que está contenida la tierra junto con el orbe de la luna. En quinto lugar, Venus, cuyo período es de nueve meses. Finalmente, en sexto lugar aparece Mercurio, que completa un giro orbital cada 80 días.

En medio de todos se asienta el sol. En efecto, ¿quién, en este espléndido templo, colocaría en mejor punto del que ocupa, desde donde puede iluminarlo todo a un mismo tiempo, a esta luminaria? En verdad, es

con toda propiedad que algunos le han llamado la pupila del mundo, otros el Espíritu [del mundo], otros, por fin, su Rector. Trismegisto le llama el Dios visible; la Electra de Sófocles, el omnividente. De este modo el sol, como reposando sobre un trono real, gobierna la familia de los astros que lo circundan. La tierra nunca se verá privada de los servicios de la luna; por el contrario, tal como dice Aristóteles en su *De animalibus*, tierra y luna poseen el máximo grado de parentesco. No obstante, la tierra concibe por el sol y de él queda preñada, dando a luz todos los años.

Así pues, encontramos en esta admirable ordenación una simetría del mundo y un éxodo de armonía entre el movimiento y la magnitud de los orbes como no pueden ser descubiertos de ninguna otra forma. Pues aquí el observador atento puede ver por qué la progresión y la retrogradación de Júpiter son mayores que las de Saturno y menores que las de Marte, mientras que las de Venus son mayores que las de Mercurio [una ojeada a la figura 32 nos muestra que el movimiento retrógrado aparente de un planeta es tanto más grande cuanto más próxima a la tierra es su órbita; he aquí una armonía suplementaria del sistema copernicano]; porque tales oscilaciones se dan con más frecuencia en Saturno que en Júpiter, pero con menos asiduidad en Marte y Venus que en Mercurio [la tierra atrapará y se dejará atrapar con mayor frecuencia por un planeta superior lento que por un planeta superior rápido, y al revés en el caso de un planeta inferior]; porque Saturno, Júpiter y Marte están más cerca de la tierra cuando se encuentran en oposición con el sol que durante sus ocultaciones y reapariciones, y, por encima de todo, porque cuando se levanta al anochecer [y por lo tanto está en posición], Marte se nos muestra aproximadamente del mismo tamaño que Júpiter, distinguiéndose tan sólo por su color rojizo; entonces parece una estrella de segunda magnitud y sólo es reconocible si se efectúa una atentísima observación con la ayuda de sextantes. Todos estos fenómenos proceden de una misma causa, el movimiento de la tierra.

El que nada de lo que acabamos de indicar aparezca en la esfera de las estrellas fijas nos indica su inmensa altitud que hace imperceptible para nuestros ojos incluso el movimiento anual [aparente] del orbe —o su imagen [paraláctica]—, pues, como se demuestra en óptica, a partir de una

cierta distancia todo objeto visible deja de serlo. En efecto, el centelleo de sus luces demuestra que aún queda un gran espacio entre el más alto de los planetas, Saturno, y la esfera de las estrellas [pues si las estrellas estuvieran muy cerca de Saturno brillarían de forma similar a éste.] Éste es el indicio que nos permite distinguir claramente los planetas, pues es necesario que exista una gran diferencia entre los cuerpos celestes dotados de movimiento y los que permanecen fijos. ¡Hasta tal punto alcanza la perfección de esta obra divina salida de las manos del gran y noble Creador!

A lo largo de este capítulo de crucial importancia, Copérnico insiste una y otra vez en la "admirable simetría" y el "claro nexo de armonía entre el movimiento y la magnitud de los orbes" que comunica a las apariencias celestes una geometría centrada en el sol. Si el sol ocupa el centro, un planeta inferior no puede aparecer demasiado alejado de él; si el sol ocupa el centro, un planeta superior estará en oposición a él cuando su posición sea lo más próxima posible a la tierra, y así sucesivamente. Éstos son los argumentos que emplea Copérnico para intentar persuadir a sus contemporáneos de la validez de su nuevo enfoque. Cada argumento se refiere a un aspecto de las apariencias que puede ser explicado *tanto* por el sistema de Copérnico *como* por el de Ptolomeo, intentando poner de manifiesto en todos y cada uno de los casos cuánto más armoniosa, coherente y natural es la explicación copernicana. El número de dichos argumentos es elevado; la suma de pruebas en favor de la armonía es, ante todo, impresionante.

Pero quizá su valor sea nulo. La "armonía" parece una extraña base de razonamiento cuando se trata de argumentar en favor del movimiento terrestre, en especial cuando se halla tan desdibujada por la compleja multitud de círculos que componen el conjunto del sistema copernicano. Los argumentos de Copérnico no son pragmáticos. No apelan al sentido utilitario de quien practica la astronomía, sino única y exclusivamente a su sentido estético. No consiguen seducir al profano que, incluso cuando ha logrado captar su alcance, se siente poco inclinado a sustituir un gran desacuerdo terrestre por las pequeñas armonías celestes. No llamaron la

atención de forma especial al astrónomo, pues las armonías sobre las que hacía hincapié Copérnico no le permitían efectuar mejor su trabajo. Las nuevas armonías no aumentaban ni la precisión ni la simplicidad. Así pues, podían atraer esencialmente, y así lo hicieron, a este grupo limitado y quizá algo irracional que se ocupaba de la astronomía matemática y cuyo neoplatónico interés por las armonías matemáticas no podía verse obstruido por páginas y más páginas de complejas matemáticas que finalmente conducían a previsiones numéricas apenas mejores que las que habían conocido hasta entonces. Por suerte, tal como veremos en el próximo capítulo, había algunos astrónomos de este tipo. Su obra constituye un elemento esencial de la revolución copernicana.

Una revolución gradual

Copérnico es denominado con frecuencia el primer astrónomo moderno por haber sido el primero en desarrollar un sistema astronómico basado en el movimiento de la tierra. Pero tal como se desprende de la lectura del *De revolutionibus*, también se le puede otorgar el título del último gran astrónomo ptolemaico. La astronomía ptolemaica significaba mucho más que un sistema basado en la inmovilidad terrestre, y Copérnico rompía con dicha tradición sólo en lo concerniente a la posición y el movimiento de la tierra. Tanto el marco cosmológico que albergaba su astronomía como su física terrestre y celeste e incluso los procedimientos matemáticos que empleó para que su sistema diera predicciones adecuadas pertenecen a la tradición establecida por los científicos antiguos y medievales.

Aunque en ciertas ocasiones los historiadores han puesto en marcha agotadoras polémicas para decidir si Copérnico era en realidad el último astrónomo antiguo o el primero de entre los modernos, el debate es absurdo en su esencia. Copérnico no es ni antiguo ni moderno, sino más bien un astrónomo renacentista en cuya obra aparecen íntimamente mezcladas dos tradiciones. Preguntarse si su obra es realmente antigua o moderna equivale a preguntarse si la única curva de mi camino pertenece a la parte que la

precede o a la que le sigue. Las dos partes del camino son visibles desde la curva, y la continuidad de aquel es evidente. Sin embargo, observado desde un punto situado antes de llegar a la curva, aquel parece dirigirse directamente hacia la misma para después desaparecer; el viraje parece ser el último punto de un camino rectilíneo. Por otro lado, si pasamos la curva y penetramos en la otra parte del camino, éste parece comenzar justamente allí. La curva pertenece con igual derecho a ambas partes del camino o no pertenece a ninguna; marca un cambio de dirección en él similar a aquel que el *De revolutionibus* marca en el desarrollo del pensamiento astronómico.

Hasta aquí, hemos hecho especial hincapié en los vínculos existentes entre el *De revolutionibus* y la tradición astronómica y cosmológica que le había precedido. Hemos minimizado, como hizo el propio Copérnico, el alcance de la innovación copernicana al esforzarnos por comprender cómo una innovación potencialmente destructiva podía emerger como producto de la tradición que acabaría derrumbando. Sin embargo, pronto veremos que no es ésta la única forma posible de enfrentarse al *De revolutionibus*, y no precisamente la que adoptaron muchos de los copernicanos posteriores. Para quienes durante los siglos XVI y XVII aceptaron la teoría de Copérnico, la importancia esencial del *De revolutionibus* residía en el único concepto nuevo que enunciaba; es decir, el de una tierra planetaria y en sus nuevas consecuencias astronómicas, las nuevas armonías que Copérnico había deducido de su innovadora idea. Para ellos, el copernicanismo significaba el triple movimiento de la tierra y, en un principio, nada más que esto. Las ideas tradicionales con que Copérnico había revestido su descubrimiento no eran, para sus sucesores, elementos esenciales dentro de su obra por la simple razón de que, tratándose de productos de una tradición antigua, no representaban una contribución personal de Copérnico a la ciencia. La causa de las polémicas que levantó el *De revolutionibus* no era los elementos tradicionales que albergaba.

Por tal razón el *De revolutionibus* puede considerarse como el punto de partida de una nueva tradición astronómica y cosmológica o como la culminación de la tradición antigua en dichos campos. Quienes abrazaron el

concepto de una tierra planetaria en movimiento iniciaron sus investigaciones en el punto en que se había parado Copérnico. Su punto de arranque era el movimiento de la tierra, lo único que necesariamente tomaban de la obra copernicana, pero los problemas con los que se enfrentaban no eran los de la antigua astronomía, los que habían ocupado a Copérnico, sino los planteados por la nueva astronomía heliocéntrica derivada de las tesis del *De revolutionibus*. Copérnico les presentaba un conjunto de problemas con los que ni él ni sus predecesores habían tenido que enfrentarse. La revolución copernicana se consumaba con la resolución de tales problemas, y la nueva tradición astronómica nacía a partir del *De revolutionibus*. La astronomía moderna vuelve sus ojos hacia el *De revolutionibus* del mismo modo que Copérnico lo había hecho sobre los trabajos de Hiparco y Ptolomeo.

Las mayores conmociones en los conceptos fundamentales de la ciencia se producen de forma gradual. Puede darse el caso de que la obra de un solo individuo desempeñe un papel preeminente en una revolución conceptual. Si así sucede, alcanza preeminencia ya sea porque, como en el *De revolutionibus*, inicia la revolución por medio de una pequeña innovación que plantea nuevos problemas a un campo de conocimiento científico o porque, como en los *Principia* de Newton, culmina un cambio revolucionario al efectuar una síntesis de los conceptos procedentes de un conjunto de trabajos diversos. El alcance de la innovación que un solo individuo puede introducir es necesariamente limitado, pues en sus investigaciones debe utilizar los instrumentos que ha heredado de una educación tradicional y en el transcurso de su vida es prácticamente imposible que consiga reemplazarlos por completo. Así pues, parece que muchos de los elementos del *De revolutionibus* que en páginas anteriores de este mismo capítulo hemos designado como incongruencias, no sean tales. El *De revolutionibus* sólo se muestra como un texto incoherente a quienes esperan encontrar en él un completo desarrollo de la revolución copernicana. Tal esperanza deriva de una interpretación errónea acerca del proceso de elaboración a que se ven sometidas las nuevas formas de pensamiento científico. Lo idóneo sería observar las limitaciones del *De*

revolutionibus como características esenciales y típicas de todo trabajo revolucionario.

La mayor parte de las aparentes incongruencias del *De revolutionibus* reflejan la personalidad de su autor, que parece adecuarse completamente a la fecundante función que desempeñó en el desarrollo de la astronomía. Copérnico era un destacado especialista y pertenecía a la renaciente tradición helenística de la astronomía matemática que centraba su interés en el problema de los planetas y dejaba de lado la cosmología. Para sus predecesores helenísticos, la absurdidad de un epiciclo desde el punto de vista de la física no había constituido un inconveniente demasiado importante dentro del sistema ptolemaico. Copérnico mostró una indiferencia similar frente a los aspectos cosmológicos cuando no se percató de las incongruencias que la idea de una tierra en movimiento introducía en el marco de un universo tradicional. Para él, la precisión matemática y celeste estaba por encima de todo; su atención se centraba en las armonías matemáticas presentadas por los cielos. Para cualquier no especialista, la concepción copernicana del universo era estrecha y el sentido de los valores que abrazaba el genial astrónomo completamente distorsionado.

Sin embargo, un interés excesivo por el cielo y un deformado sentido de los valores sean quizá las características esenciales que requiera un hombre cuya obra deba dar nacimiento a una revolución en los campos de la astronomía y la cosmología. Las anteojeras que restringían el campo de visión de Copérnico a los fenómenos celestes pueden haber desempeñado un papel radicalmente funcional. Los desacuerdos de algunos grados en las previsiones astronómicas le perturbaron hasta tal punto que, en su esfuerzo por darles solución, pudo caer en una herejía cosmológica: el movimiento terrestre. Su espíritu se hallaba tan absorto por las armonías geométricas que quizá lo único que le impulsó a adherirse a dicha herejía fue la armonía que de ella se desprendía, incluso cuando se viera incapaz de resolver el problema que le había llevado hasta tal punto. Finalmente, su estrechez de miras le ayudó a eludir las consecuencias extra-astronómicas de su

descubrimiento, consecuencias que llevaron a rechazar como absurda tal innovación a los hombres con una más amplia visión del cosmos.

Por encima de todo, la dedicación de Copérnico al estudio de los movimientos celestes es la responsable del meticuloso detalle con que exploró las consecuencias matemáticas del movimiento terrestre y del cuidado con que supo adaptar éstas a lo que ya se sabía sobre los cielos. Este detallado estudio técnico es la auténtica contribución de Copérnico. Antes y después de él, cosmólogos más radicales se habían dedicado a esbozar a grandes rasgos un universo infinito poblado por una infinidad de mundos, pero ninguno de ellos produjo una obra similar a los últimos cinco libros del *De revolutionibus*. Al mostrar por primera vez que el trabajo del astrónomo podía efectuarse mucho más armoniosamente, dichos libros proporcionaron una firme base sobre la que edificar una nueva tradición astronómica. Si el cosmológico Libro Primero de Copérnico hubiera aparecido sin el complemento técnico de los restantes textos que constituyen el *De revolutionibus*, la revolución copernicana habría sido con toda justicia conocida bajo otro nombre.

Capítulo 6

LA ASIMILACIÓN DE LA ASTRONOMÍA COPERNICANA

ACOGIDA DISPENSADA A LA OBRA DE COPÉRNICO

Copérnico murió en 1543, el mismo año en que fue publicado el *De revolutionibus*, y la tradición nos cuenta que recibió el primer ejemplar del libro de su vida en su lecho de muerte. El libro tuvo que presentar batalla sin la ayuda adicional de su autor. Pero para afrontar los venideros combates Copérnico había forjado un arma casi ideal; había escrito una obra ininteligible para todo el mundo, excepción hecha de los astrónomos eruditos de su época. Fuera del mundo de la astronomía, la conmoción inicial causada por el *De revolutionibus* fue bastante escasa. Con anterioridad al desarrollo en gran escala de una férrea oposición por parte de los profanos en la materia y del clero, la mayor parte de los mejores astrónomos europeos, a quienes iba dirigido el libro, ya había estimado el carácter indispensable de una u otra de las técnicas matemáticas expuestas por Copérnico. Así pues, se hacía del todo imposible suprimir la obra en su totalidad, especialmente porque se trataba de un libro impreso y no de un manuscrito, como en el caso de los trabajos de Nicolás de Oresme y Jean Buridan. Intencionadamente o no, la victoria final del *De revolutionibus* se consiguió por infiltración.

Durante las dos décadas anteriores a la publicación de su obra maestra, Copérnico alcanzó general reconocimiento como uno de los más destacados

astrónomos europeos. Desde alrededor de 1515 circulaban por Europa noticias sobre sus investigaciones, incluyendo las relativas a su nueva hipótesis. La publicación del *De revolutionibus* era esperada con impaciencia. Quizá, ante la aparición del libro, los contemporáneos de Copérnico se mostraran escépticos respecto a su hipótesis fundamental y algo defraudados por la complejidad de la nueva teoría astronómica, pero no por ello se vieron menos obligados a reconocer que el libro de Copérnico era el primer texto de un astrónomo europeo que podía rivalizar en profundidad y perfección con el *Almagesto*. Un buen número de los tratados astronómicos de un nivel elevado escritos durante los cincuenta años que siguieron a la muerte de Copérnico se referían a él como a un "segundo Ptolomeo" o al "principal artífice de nuestra época"; además, estos textos hacían suyos datos, cálculos y esquemas pertenecientes al *De revolutionibus*, al menos de los de aquellas partes del libro no relacionadas con el movimiento terrestre. Durante la segunda mitad del siglo XVI, el *De revolutionibus* se convirtió en una obra de referencia para todos los que se ocupaban de los problemas fundamentales planteados por la investigación astronómica.

Sin embargo, el éxito del *De revolutionibus* no implica el éxito de su tesis central. La fe de la mayor parte de los astrónomos en la inmovilidad de la tierra siguió inquebrantable durante un buen lapso de tiempo. Autores que rendían homenaje a la erudición de Copérnico, hacían uso de sus diagramas o citaban su método de determinación de la distancia de la tierra a la luna, acostumbraban a ignorar el movimiento terrestre o a rechazarlo como absurdo. Por otro lado, los escasos textos en los que se mencionaba con respeto la hipótesis de Copérnico raramente la defendían o hacían uso de ella. Con muy pocas excepciones notables, la más favorable de las primeras reacciones contra la innovación copernicana puede venir tipificada por la observación del astrónomo inglés Thomas Blundeville, quien escribía: "Copérnico […] afirma que la tierra gira y que el sol está inmóvil en medio de los cielos, hipótesis falsa con cuya ayuda ha llevado a cabo demostraciones sobre los movimientos y revoluciones de las esferas celestes mucho más ajustadas a la verdad que todas las que se habían

efectuado anteriormente”.[6.1] Esta observación de Blundeville apareció en 1594 en un libro elemental sobre astronomía en el que se daba por sentada la inmovilidad de la tierra. Con todo, el tenor del comentario de Blundeville debió remitir de inmediato a sus lectores más dotados y competentes en busca de un ejemplar del *De revolutionibus*, un libro que, sea como fuere, ningún experto en astronomía podía ignorar. Así pues, el *De revolutionibus* fue ampliamente conocido desde el primer momento, pero no a causa de su extraña hipótesis, sino más bien a pesar de ella.

Sin embargo, la amplia audiencia de que gozó el libro aseguraba un número pequeño, aunque en constante aumento, de lectores capaces de descubrir las armonías de Copérnico y dispuestos a admitirlas como evidentes. Algunos de los conversos al nuevo sistema contribuirían de diferentes maneras con sus trabajos a la expansión de las tesis copernicanas. La *Narratio prima* de Georg Joachim Rheticus (1514-1576), el más antiguo discípulo de Copérnico, siguió siendo, aún mucho tiempo después de su primera edición en 1540, la mejor descripción técnica resumida de los nuevos métodos astronómicos. La defensa elemental y vulgarizadora del copernicanismo publicada en 1576 por el astrónomo inglés Thomas Digges (c. 1546-1595) contribuyó enormemente a difundir la idea del movimiento terrestre fuera del restringido círculo de los astrónomos. Las enseñanzas e investigaciones de Michael Maestlin (1550-1631), profesor de astronomía en la universidad de Tubinga, ganaron algunos adeptos, Kepler entre ellos, para la nueva astronomía. A través de las enseñanzas, obras e investigaciones de hombres como los que acabamos de mencionar, el copernicanismo fue ganando terreno de forma inexorable, aunque los astrónomos que prestaban su adhesión al movimiento de la tierra siguieran siendo una pequeña minoría.

Con todo, el pequeño número de quienes se manifestaban copernicanos no es un índice adecuado para medir el éxito de la innovación de Copérnico. Fueron muchos los astrónomos que encontraron la forma de explotar el sistema matemático de Copérnico y contribuir al éxito de la nueva astronomía rechazando o manteniendo en silencio la cuestión del movimiento terrestre. La astronomía helenística les proporcionaba un

precedente de primera categoría. El propio Ptolomeo jamás pretendió que todos los círculos utilizados en su *Almagesto* para calcular las posiciones de los planetas gozaran de una existencia real desde el punto de vista físico. Antes bien, se trataba exclusivamente de artificios matemáticos útiles. Por idénticas razones, los astrónomos renacentistas se sentían con plena libertad para considerar al círculo que representaba la órbita terrestre como una ficción matemática, cuya utilidad quedaba restringida a efectos de cálculo. Podían calcular, y así lo hicieron ocasionalmente, la posición de los planetas *como si* la tierra se desplazara, sin tener por ello que comprometerse con la realidad física de dicho movimiento. Andreas Osiander, el teólogo luterano que se ocupó de la edición de la obra de Copérnico, recomendó tal alternativa a los futuros lectores en un prefacio anónimo que adjuntó al texto del *De revolutionibus* sin la autorización de Copérnico. Con toda probabilidad este prefacio apócrifo no llevó a equívoco a demasiados astrónomos aunque algunos de ellos no dejaran de aprovechar la alternativa que en él se les ofrecía. Servirse del sistema matemático de Copérnico sin defender el movimiento físico de la tierra constituía un cómodo medio de escapar al dilema planteado en el *De revolutionibus* por el contraste entre las armonías celestes y las disonancias terrestres. Precisamente fue por este punto por donde la convicción inicial del astrónomo en la absurdidad del movimiento terrestre fue perdiendo poco a poco su fuerza.

Erasmus Reinhold (1511-1553) fue el primer astrónomo en prestar un importante servicio a la causa copernicana, aun sin declararse explícitamente a favor del movimiento de la tierra. En 1551, sólo ocho años después de la publicación del *De revolutionibus*, publicó un nuevo y muy completo conjunto de tablas astronómicas calculadas según los métodos matemáticos desarrollaros por Copérnico, tablas que pronto se hicieron indispensables a astrónomos y astrólogos fuera cual fuese su opinión sobre la posición y el movimiento terrestres. Las *Tablas prusianas* de Reinhold, llamadas así en honor de su protector, el duque de Prusia, fueron las primeras tablas completas que se elaboraban en Europa desde hacía tres siglos. Las antiguas tablas, que contenían algunos errores de base, quedaron totalmente obsoletas a partir de este momento; había sonado ya su hora. El

trabajo sumamente cuidadoso de Reinhold, fundamentado sobre datos más numerosos y mejores que los que habían estado a disposición de quienes calcularan las tablas del siglo XIII, dieron origen a una serie de nuevas tablas que, para la mayor parte de sus aplicaciones, eran muy superiores a las antiguas. Qué duda cabe, no eran de una precisión perfecta, pues el sistema matemático de Copérnico no era intrínsecamente superior al de Ptolomeo; se hallaban frecuentes errores del orden de un día en las previsiones de eclipses de luna, y la determinación de la longitud del año mediante la *Tablas prusianas* era en realidad algo menos precisa que la efectuada por medio de tablas más antiguas. Con todo, la mayor parte de las comparaciones ponía de manifiesto la superioridad del trabajo de Reinhold, y sus tablas se convirtieron paulatinamente en punto de referencia canónico para los astrónomos. Se sabía que dichas tablas derivaban de la teoría astronómica del *De revolutionibus,* con lo que, de forma inevitable, el prestigio de Copérnico y de su obra se vieron aumentados. El uso de las *Tablas prusianas* comportaba, como mínimo, una aquiescencia implícita al copernicanismo.

Durante la segunda mitad del siglo XVI, los astrónomos no podían prescindir ni del *De revolutionibus* ni de las tablas basadas en él. La propuesta de Copérnico ganaba terreno lentamente, pero, según parece, de forma inexorable. Para las sucesivas generaciones de astrónomos, cada vez menos inclinados, por experiencia y formación, a dar por supuesta la inmovilidad de la tierra, las nuevas armonías constituyeron un argumento más y más fuerte en favor del movimiento terrestre. Además, hacia finales del siglo, los primeros seguidores del copernicanismo comenzaban a descubrir nuevas pruebas en favor de dicho movimiento. Por consiguiente, en el caso en que la elección entre el universo copernicano y el universo tradicional hubiera dependido tan sólo de los astrónomos, puede afirmarse casi con toda segundad que la propuesta de Copérnico también habría alcanzado una tranquila y gradual victoria. No obstante, la decisión no concernía exclusivamente, ni incluso preferentemente, a los astrónomos, y, a medida que el debate excedía los límites de los cenáculos astronómicos, adquiría caracteres más y más tumultuosos. La innovación copernicana era

vista como absurda e impía por la mayor parte de quienes no se dedicaban al estudio detallado de los movimientos celestes. Aun cuando se las comprendiera, las ostentosas armonías no se mostraban en modo alguno como evidentes. La disputa resultante fue generalizada, clamorosa y agria.

Sin embargo, los clamores hicieron su aparición con lentitud. Inicialmente, pocos fueron los individuos ajenos a la astronomía que tuvieron conocimiento de la innovación de Copérnico o que la consideraron como algo más que una aberración pasajera, susceptible de ser colocada junto a otras que, ya en épocas anteriores, habían hecho su aparición para esfumarse poco tiempo después. La mayor parte de los textos y manuales elementales de astronomía empleados durante la segunda mitad del siglo XVI habían sido redactados en época muy anterior a la de Copérnico. El libro de rudimentos de Juan de Sacrobosco, escrito en el siglo XIII, aún seguía siendo un clásico entre los textos de nivel elemental, mientras que los nuevos manuales preparados en fecha posterior a la publicación del *De revolutionibus* acostumbran a no mencionar a Copérnico o apenas evocan, con una o dos frases, la innovación por éste introducida. Los libros populares de cosmología que describían la estructura del universo para uso de profanos aún eran más exclusivamente aristotélicos, tanto en su forma como en su fondo. Los autores de estos textos desconocían la existencia de Copérnico o, cuando no era así, por lo general la ignoraban. A excepción quizá de algunos centros protestantes de enseñanza, el copernicanismo no parece haber tenido consecuencias cosmológicas durante las primeras décadas posteriores a la muerte de Copérnico. Al margen de los círculos astronómicos, difícilmente puede afirmarse que cosechara algún gran éxito antes de comienzos del siglo XVII.

Durante el siglo XVI existieron algunas reacciones por parte de individuos ajenos al cultivo de la astronomía que nos proporcionan un anticipo de la inmensa controversia que iba a desencadenarse, pues por lo general se trata de reacciones inequívocamente negativas. Copérnico y sus escasos seguidores eran ridiculizados a causa del carácter absurdo del concepto de una tierra en movimiento, aunque todavía sin la acritud y la

elaborada dialéctica que se manifestaron cuando fue claro que el copernicanismo iba a convertirse en un adversario peligroso e inflexible. Un largo poema cosmológico, inicialmente publicado en Francia en 1578 y que durante un siglo y cuarto iba a gozar de gran popularidad tanto en dicho país como en Inglaterra, proporciona la siguiente descripción típica de los partidarios del copernicanismo:

> Tels sont, comme je crois, ces écrivains qui pensent,
> Que ce ne sont les cieux, ou les astres, qui dansent,
> Alentour de la Terre. Mais que la Terre fait
> Chaque jour naturel un tour vraiment parfait
> Que nous semblons ceux-là, qui pour courir fortune
> Tentent le dos flottant de l'azuré Neptune,
> Qui, dis-je, cuident voir, quand ils quittent le port,
> La nef demeurer ferme, et reculer le bord[…].
> Ainsi le trait qu'en haut l'archer décocherait
> Aplomb sur notre chef jamais ne tomberait:
> Mais ferait tout ainsi qu'une pierre qu'on jette
> De la voguante proue en haut sur notre tête,
> Qui ne chet dans la nef, mais loin de notre dos
> Ou plus le fleuve court, retombe dans les flots.
> Ainsi tant d'oiselets, qui prennent la volée
> Des Hespérides bords vers l'aurore emperlée […].
> Les boulets foudroyés par la bouche fumante
> D'un canon affûte devers l'Inde perleuse
> Sembleraient reculer. Veut que le vite cours,
> Que notre rond séjour parferait tous les jours,
> Devancerait cent fois par la vitesse inesle
> Des boulets, vents, oiseaux, l'effort, le souffle, l'aile.
> Armé de ces raisons je combattrais en vain
> Les subtiles raisons de ce docte Germain,
> Qui pour mieux de ces feux sauver les apparences
> Assigne, industrieux, à la Terre trois danses.[6.2]

Puesto que el autor de esta refutación poética del copernicanismo era un poeta, no un científico o un filósofo, no tienen por qué sorprendernos su conservadurismo en materia de cosmología ni su adhesión a las fuentes clásicas. Pero no debe olvidarse que era de boca de poetas y vulgarizadores, antes que de la de los astrónomos, de donde extraía sus conocimientos cosmológicos el hombre medio de los siglos XVI y XVII. *La Semaine ou la Création du Monde* de Du Bartas, texto del que forma parte el pasaje que acabamos de citar, era un libro mucho más leído y de mayor influencia que el *De revolutionibus*.

En todo caso, las condenas espontáneas y acríticas a la obra de Copérnico no eran exclusivas de los vulgarizadores poco originales y con mentalidad conservadora. Jean Bodin, conocido como uno de los más avanzados y creativos filósofos políticos del siglo XVI, desecha en términos casi idénticos la innovación introducida por Copérnico:

Nadie que se fíe de sus sentidos o que posea algún conocimiento, por escaso que sea, de física pensará jamás que la tierra, con el peso y la masa que posee, titubee arriba y abajo de su propio centro y del centro del sol; pues a la más ligera sacudida de la tierra, veríamos desmoronarse ciudades y fortalezas, pueblos y montañas. Cierto cortesano áulico, cuando un astrólogo de la corte sostenía ante el duque Alberto de Prusia las teorías de Copérnico, dijo, volviéndose hacia el servidor que escanciaba un vino de Falerno: “Ten cuidado con la garrafa, no vaya a volcarse”. Pues, si la tierra estuviera en movimiento, ni una flecha lanzada hacia arriba ni una piedra abandonada desde lo alto de una torre caerían al pie de su vertical, sino delante o detrás de ésta […]. Tal como dice Aristóteles, todas las cosas, cuando han encontrado los lugares que convienen a sus respectivas naturalezas, en ellos permanecen. En consecuencia, puesto que se le ha asignado a la tierra un lugar que conviene a su naturaleza, no es posible hacerla ir de acá para allá mediante otro movimiento distinto al suyo propio. [6.3]

En este pasaje Bodin se muestra tradicionalista, aunque en realidad no era precisamente tal su pensamiento. A causa del tono radical y ateo generalizado en que estaba escrito el libro del que acabamos de extraer el párrafo precedente, en 1628 fue colocado en el índice de libros cuya lectura estaba prohibida a todo católico, lugar en el que sigue permaneciendo a pesar de que su autor profesaba también tal religión. Bodin estaba realmente dispuesto a romper con la tradición, pero esto no era condición suficiente para convertir un hombre al copernicanismo. También era necesario, casi siempre, comprender la astronomía y tomarse sus problemas muy en serio. Excepto para aquellos con cierta inclinación astronómica, el movimiento de la tierra seguía pareciendo casi tan absurdo en los años posteriores a la muerte de Copérnico como lo había parecido anteriormente.

Los argumentos anticopernicanos sugeridos por Du Bartas y Bodin pueden considerarse insertos en el marco teórico ya anticipado en nuestras discusiones sobre el universo aristotélico en los capítulos 3 y 4. Bajo uno u otro aspecto, estos argumentos aparecen una y otra vez durante la primera mitad del siglo XVII, momento en que la controversia sobre el movimiento terrestre alcanza su mayor violencia e intensidad. El movimiento de la tierra, decíase, viola los principios del sentido común, entra en conflicto con las ya largamente establecidas leyes del movimiento y ha sido simplemente sugerido “para mejor salvar las apariencias de los movimientos estelares”, incentivo minúsculamente ridículo para una revolución. Dichos argumentos poseían la suficiente fuerza como para convencer a la mayor parte de la gente. No obstante, no eran las armas más potentes al servicio del anticopernicanismo ni tampoco las que generaron una mayor efervescencia. Este papel fue jugado por la religión y, en particular, por las Escrituras.

La citación de las Escrituras en contra de Copérnico empezó mucho antes de la publicación del *De revolutionibus*. Según uno de sus discípulos, en un célebre pasaje de las *Tischreden* Martín Lutero ya habría afirmado en 1539:

Algunos han prestado atención a un astrólogo advenedizo que se esfuerza en demostrar que es la tierra quien gira y no el cielo o el

firmamento, el sol y la luna […]. Este loco anhela trastocar por completo la ciencia de la astronomía; pero las Sagradas Escrituras nos enseñan (Josué 10:13) que Josué ordenó al sol, y no a la tierra, que se parara.[6.4]

Melanchthon, el principal lugarteniente de Lutero, pronto se unió al creciente clamor de los protestantes contra Copérnico. Seis años después de la muerte de éste, escribía:

Los ojos son testigos de la revolución de los cielos a través del espacio cada veinticuatro horas. Sin embargo, algunos, por amor a la novedad o para hacer gala de ingenio, han inferido de ello que la tierra se mueve, y sostienen que ni el sol ni la octava esfera giran […]. Es una falta de honestidad y de decencia mantener públicamente tales ideas, y el ejemplo es pernicioso. Un espíritu justo debe admitir la verdad revelada por Dios y someterse a ella.[6.5]

Acto seguido Melanchthon procede a agrupar una serie de pasajes bíblicos anticopernicanos, insistiendo en los célebres versículos del Eclesiastés (1:4-5): “La tierra permanece en su posición a perpetuidad” y “el sol sale y se pone, apresurándose a ocupar de nuevo el lugar por donde se levantará”. Finalmente, sugiere que se tomen severas medidas para contener la impiedad de los copernicanos.

Pronto se sumaron otros dirigentes protestantes al movimiento de repulsa frente a las tesis de Copérnico. Calvino, en su *Comentario al Génesis*, citaba el primer verso del nonagésimo tercer salmo —“la tierra también es estable, no puede gozar de movimiento”— y se preguntaba “¿quién osará colocar la autoridad de Copérnico por encima de la del Espíritu Santo?”.[6.6] A medida que iba pasando el tiempo, las citas bíblicas adquirían un lugar cada vez más privilegiado en la argumentación contra Copérnico. En las primeras décadas del siglo XVII, eclesiásticos de todas las creencias buscaron línea por línea en la Biblia un nuevo pasaje que pudiera confundir a los partidarios del movimiento terrestre. Con frecuencia

siempre en aumento, los copernicanos recibían los epítetos de “infieles” y “ateos”, y cuando alrededor de 1610 la Iglesia católica se adhirió oficialmente a la batalla contra el copernicanismo, el cargo pasó a ser de pura y simple herejía. En 1616 fueron puestas en el índice el *De revolutionibus* y todas las obras en que se admitía el movimiento de la tierra. Se prohibió a los católicos enseñar, e incluso leer, las teorías copernicanas, salvo en versiones expurgadas de toda referencia a una tierra en movimiento y a un sol central.

El precedente esbozo nos muestra cuáles fueron las armas más populares y potentes del arsenal desplegado contra Copérnico y sus discípulos, pero no indica adecuadamente cuál fue el objeto real de esta lucha. La mayor parte de los citados en líneas anteriores estaban tan dispuestos a rechazar el movimiento terrestre como idea absurda o como concepción en conflicto con la letra de las Escrituras que no consiguieron demostrar, y quizás en un primer momento no lo advirtieran plenamente, que la teoría de Copérnico era la negación en potencia de todo un sistema de pensamiento. Su propio dogmatismo enmascara sus verdaderas motivaciones, pero no las elimina. Lo que estaba en juego era bastante más que una representación del universo o unas pocas líneas de las Escrituras. El drama de la vida cristiana y la moralidad edificada sobre él no se adaptarían de forma demasiado satisfactoria a un universo en el que la tierra no fuese más que un planeta entre otros muchos. La cosmología, la moral y la teología habían estado íntimamente mezcladas en el pensamiento cristiano tradicional descrito por Dante a principios del siglo XIV. El vigor y la violencia desplegados hasta el paroxismo en la controversia copernicana testifican la fuerza y la vitalidad de dicha tradición aún tres siglos más tarde.

Cuando fue tomada en serio, la teoría de Copérnico planteó algunos problemas de enorme importancia a los cristianos. Por ejemplo, si la tierra no era más que uno de los seis planetas, ¿en qué iban a convertirse las historias de la caída y la redención, con su inmensa importancia en la concepción cristiana de la vida? Si había otros cuerpos celestes semejantes a la tierra, con toda seguridad la bondad de Dios habría querido que

también se hallaran habitados. Pero si existían hombres en otros planetas, ¿cómo podrían descender de Adán y Eva cómo habrían podido heredar el pecado original, que explica el de otra forma incomprensible trabajo del hombre sobre una tierra creada para él por una divinidad buena y omnipotente? ¿Cómo habrían podido conocer los hombres de otros planetas la presencia del Salvador, que les abría la posibilidad de una vida eterna? O también, si la tierra es un planeta, y por consiguiente un cuerpo celeste situado fuera del centro del universo, ¿qué se hace de la posición intermedia, pero central, del hombre, situado entre los demonios y los ángeles? Si la tierra, en tanto que planeta, participa de la naturaleza de los cuerpos celestes no puede ser un albañal de iniquidad del que el hombre espera pacientemente escapar para gozar de la divina pureza de los cielos. Por su parte, los cielos tampoco pueden seguir siendo una adecuada residencia para Dios si participan de los males e imperfecciones tan claramente visibles sobre una tierra planetaria. Y lo peor de todo: si el universo es infinito, tal como piensan muchos copernicanos, ¿dónde puede estar situado el trono de Dios? ¿Cómo van a poder encontrarse el hombre y Dios en el seno de un universo infinito?

Todas estas preguntas tienen respuestas, pero no fueron encontradas con facilidad. Las soluciones dadas a los problemas planteados no fueron incongruentes y, además, contribuyeron a modificar la religión del hombre común. Las teorías de Copérnico implicaban una transformación de la forma en que el hombre concebía su relación con Dios y de las bases de su moral. Una tal transformación no podía tener lugar en un abrir y cerrar de ojos, y apenas si se inició mientras las pruebas en favor del copernicanismo siguieron siendo tan poco concluyentes como lo habían sido en el *De revolutionibus*. Antes del pleno triunfo de la nueva corriente, observadores cuidadosos podrían haberse percatado de la incompatibilidad entre los valores tradicionales y la nueva cosmología, y la frecuencia con que se lanzaron acusaciones de ateísmo contra los copernicanos prueba que el concepto de una tierra planetaria se presentaba a muchos observadores como una amenaza para el orden establecido.

No obstante, la acusación de ateísmo no constituye más que una prueba indirecta. Un testimonio de mayor fuerza nos lo proporcionan aquellos hombres que se sintieron inclinados a considerar seriamente la innovación de Copérnico. Ya en 1611, el poeta y teólogo inglés John Donne escribía, dirigiéndose a los copernicanos, que "es muy posible que tengáis razón […]. [En todo caso, vuestras ideas] progresan en el espíritu de todo hombre".[6.7] Pero Donne poco de positivo creía descubrir en el cambio inminente. El mismo año en que a regañadientes concedía la posibilidad de que la tierra se moviese, expresó su malestar ante la inminente disolución de la cosmología tradicional en *The anatomy of the world*, un poema en el que "se muestra la fragilidad y decadencia del mundo en su conjunto". Parte de la desazón de Donne derivaba específicamente del copernicanismo:

> [The] new Philosophy calls all in doubt,
> The Element of fire is quite put out;
> The Sun is lost, and th'earth, and no man's wit
> Can well direct him where to look for it.
> And freely men confess that this world's spent,
> When in the Planets, and the Firmament
> They seek so many new; then see that this
> Is crumbled out again to his Atomies.
> 'Tis all in pieces, all coherence gone;
> All just supply, and all Relation:
> Prince, Subject, Father, Son, are things forgot,
> Por every man alone thinks he hath got
> To be a Phoenix, and that then can be
> None of that kind, of which he is, but he.[6.8]

Cincuenta y seis años más tarde, cuando la gran mayoría de científicos ya había admitido al menos el movimiento de la tierra y su estatuto de planeta, las teorías de Copérnico plantearon al poeta inglés John Milton idéntico problema de moral cristiana, aunque su forma de solucionarlo fue distinta. Milton pensaba, lo mismo que Donne, que la innovación

introducida por Copérnico muy bien podía corresponder a la verdad. En su *Paraíso perdido*, Milton efectúa una amplia descripción de los dos grandes y enfrentados sistemas del mundo, el ptolemaico y el copernicano, rehusando tomar partido por ninguno de ellos en lo que él considera como una abstrusa controversia técnica. No obstante, en su poema, cuyo propósito era "justificar los caminos de Dios hacia el hombre",[6.9] se vio obligado a utilizar un marco de referencia cosmológico tradicional. El universo del *Paraíso perdido* no es absolutamente idéntico al de Dante, pues las ubicaciones del cielo y el Infierno en la obra de Milton derivan de una tradición aún más antigua que la que da sostén a la obra del gran poeta italiano. Con todo, la tierra, que es el escenario donde tiene lugar la caída del hombre, sigue siendo para Milton un cuerpo único, estable y central, creado por Dios para el hombre. A pesar de que había transcurrido más de un siglo desde la publicación del *De revolutionibus*, el drama cristiano y la moral sobre él fundamentada no podían adaptarse a un universo en el que la tierra era un mero planeta y en el que continuamente podían ser descubiertos nuevos mundos "en los planetas y en el firmamento".

La desazón de Donne y la elección cosmológica de Milton ilustran las producciones extracientíficas que a lo largo del siglo XVII formaron parte integrante de la controversia sobre el copernicanismo. Son estos aspectos, mucho más que su aparente absurdidad o su conflicto con las leyes establecidas del movimiento, los que explican la hostilidad que encontró la teoría de Copérnico fuera de los círculos científicos. Sin embargo, quizá no expliquen de forma completamente satisfactoria la intensidad de dicha hostilidad o la voluntad manifestada por los líderes católicos y protestantes de convertir el anticopernicanismo en doctrina oficial de la Iglesia para poder justificar la persecución de los copernicanos. Es fácil comprender la existencia de una violenta resistencia a la innovación de Copérnico —su manifiesta absurdidad y su carácter destructivo no se veían compensados por una prueba fehaciente—, pero no lo es en absoluto captar el significado de las formas extremas que tomó en determinadas ocasiones tal movimiento de oposición. Hasta mediados del siglo XVI, la historia de la cristiandad ofrece escasos precedentes de la rigidez con que los líderes oficiales de las

principales iglesias aplicaron al pie de la letra las escrituras a fin de eliminar una teoría científica y cosmológica. Incluso durante los primeros siglos de la Iglesia católica, cuando Padres de la Iglesia tan eminentes como Lactancio habían hecho uso de las Escrituras para destruir la cosmología clásica, jamás se había impuesto a los fieles la obligación de adherirse a la posición oficial de la Iglesia ni lo tocante a cuestiones cosmológicas.

La acritud de la oposición oficial de los protestantes es, en la práctica, mucho más fácil de comprender que la de los católicos, pues puede ser plausiblemente relacionada con una controversia más fundamental que emergió al materializarse la separación entre ambas iglesias. Lutero, Calvino y sus seguidores perseguían un retorno al cristianismo primitivo, al cristianismo que podía descubrirse en las palabras del propio Jesús y de los primeros Padres de la Iglesia. Para los protestantes, la Biblia constituía la única fuente fundamental del saber cristiano, y rechazaban con vehemencia el ritual y las sutilidades dialécticas que la autoridad de los sucesivos concilios había interpuesto entre el creyente y la suprema fuente de su fe. Detestaban la interpretación metafórica y alegórica de las Escrituras, y su adhesión literal al contenido de la Biblia en materia de cosmología no tenía parangón posible desde las ya lejanas épocas de Lactancio, Basilio o Cosmas Indicopleustes. Desde su punto de vista, Copérnico muy bien podía simbolizar todas las tortuosas reinterpretaciones que, durante las últimas décadas de la Edad Media, habían separado a los cristianos de los fundamentos de su fe. Con tal perspectiva, la violencia de los ataques dirigidos contra Copérnico por el protestantismo oficial parece casi natural. Tolerar sus teorías equivalía a tolerar la nefasta actitud hacia las Sagradas Escrituras y hacia el conocimiento en general que, según los protestantes, había sumergido en el error al cristianismo.

Así pues, el copernicanismo se vio indirectamente involucrado en la amplia batalla religiosa que enfrentaba a las iglesias católica y protestante, hecho que debe explicar en parte la excesiva acrimonia que desencadenó dicha controversia. Dirigentes protestantes tales como Lutero, Calvino y Melanchthon blandieron las Escrituras contra Copérnico e incitaron a la represión contra sus seguidores. Puesto que los protestantes no dispusieron

jamás de un aparato policial comparable al de la Iglesia católica, sus medidas represivas raramente tuvieron tanta eficacia como las puestas en juego por los católicos años después, y abandonaron la lucha con mayor facilidad que los católicos cuando las teorías de Copérnico se vieron confirmadas por pruebas indiscutibles. No obstante, lo cierto es que la primera oposición efectiva institucionalizada al copernicanismo surge de las líneas protestantes. El silencio de Reinhold sobre la validez física del sistema matemático que había empleado para elaborar sus *Tablas prusianas* es generalmente interpretado como un indicio de la oposición oficial a las tesis de Copérnico que existía en la universidad protestante de Wittenberg. Osiander, que adjuntó el prefacio apócrifo al *De revolutionibus*, era protestante. Rheticus, el primer defensor explícito de la astronomía de Copérnico, también lo era, pero su *Narratio Prima* fue escrita mientras estaba lejos de Wittenberg y en época anterior a la publicación del *De revolutionibus*; después de su regreso a Wittenberg, ya no publicó más escritos copernicanos.

Durante los sesenta años inmediatamente posteriores a la muerte de Copérnico, la oposición de los católicos a su teoría fue mínima si se la compara con la desplegada por los protestantes. Los eclesiásticos católicos expresaban a título individual su incredulidad o aversión por la nueva idea de una tierra en movimiento, pero la Iglesia como institución global se mantuvo en el más absoluto silencio. Ocasionalmente, incluso se comentaba o enseñaba el *De revolutionibus* en las principales universidades católicas. Las *Tablas prusianas* de Reinhold, establecidas a partir del sistema matemático de Copérnico, se emplearon en la reforma del calendario promulgada para el mundo católico en 1582 por Gregorio XIII. Copérnico había sido un clérigo con excelente reputación, cuyos juicios en cuestiones de astronomía como en otras materias eran apreciados. Su libro había sido dedicado al papa, y entre los amigos que le habían urgido su publicación se contaban un obispo y un cardenal católicos. Durante los siglos XIV, XV y XVI la Iglesia no impuso doctrina alguna a sus fieles en materia de cosmología. El propio *De revolutionibus* era un producto de la libertad concedida al clero en los dominios de la ciencia o la filosofía secular, y la Iglesia, con

anterioridad a la aparición del *Del revolutionibus*, había contemplado el surgimiento de conceptos cosmológicos aún más revolucionarios sin ninguna convulsión teológica. En el siglo XV, Nicolás de Cusa, eminente cardenal y embajador del papa, había propuesto una cosmología neoplatónica radical sin ni siquiera preocuparse por el conflicto entre sus teorías y las Escrituras. A pesar de que el Cusano describía la tierra como un astro móvil, análogo al sol y a las otras estrellas, y de que sus obras alcanzaron amplia difusión y gran influencia, no se vio condenado, ni tan siquiera criticado, por la Iglesia.

En consecuencia, cuando en 1616 y, de forma más abierta, en 1633, la Iglesia prohibió enseñar o creer que el sol ocupaba el centro del universo y la tierra giraba a su alrededor, trastocaba una postura que durante siglos había formado parte implícita de la práctica católica. Este cambio de actitud contrarió a un cierto número de fervientes católicos, pues comprometía a la Iglesia oponiéndola a una doctrina física sobre la que casi cada día aparecían nuevas pruebas en su favor, a la vez que dejaba de lado otras claras alternativas más favorables al entendimiento de ambas líneas de pensamiento. Las mismas consideraciones que en los siglos XII y XIII habían permitido a la Iglesia adoptar las teorías de Aristóteles y Ptolomeo, habrían podido ser aplicadas en el siglo XVII con respecto a la propuesta de Copérnico. Es más; hasta cierto punto ya se había hecho uso de ellas. Cuando en el siglo XIV Nicolás de Oresme discutía el problema de la rotación diurna terrestre, no pasaba por alto el testimonio de las Escrituras sobre la inmovilidad de la tierra. Había citado los dos pasajes bíblicos traídos a colación en páginas anteriores para concluir:

Respecto al […] argumento de las Sagradas Escrituras que afirma que el sol gira, […] puede decirse que en esta parte se conforman a la manera del lenguaje humano común, tal como lo hace en otros muchos lugares, como cuando está escrito que Dios se arrepiente, que está colérico, o está calmado, y tantas otras cosas que no son tal como la letra indica. También, y relacionado con nuestro problema, leemos que Dios cubre el cielo de

nubes: […] y, también aquí, en realidad son las nubes quienes están cubiertas por el cielo.[6.10]

Aunque la reinterpretación exigida por la teoría de Copérnico debía ser mucho más drástica y onerosa, no hay duda de que habría bastado con argumentos del tipo de los expuestos. Durante los siglos XVIII y XIX se recurrió a argumentos muy parecidos, mientras que en el propio siglo XVII, en el momento en que se hizo oficial la decisión de condenar la teoría de Copérnico, ciertos líderes católicos reconocieron que tal vez fuera necesaria cierta reformulación de gran alcance. En 1615, el cardenal Bellarmino, la más alta entre las autoridades eclesiásticas que un año después condenarían las tesis copernicanas, escribía a Foscarini, seguidor de Copérnico:

Si existiera una prueba real de que el sol está en el centro del universo, la tierra está en el tercer cielo y no es el sol quien gira alrededor de la tierra, sino ésta alrededor del sol, entonces deberíamos proceder con gran prudencia en la explicación de los pasajes de las Escrituras que parecen enseñar lo contrario y admitir, antes de declarar falsa una opinión de la que se ha demostrado su verdad, que no los habíamos comprendido.[6.11]

Con toda probabilidad el liberalismo de Bellarmino es más aparente que real. Inmediatamente después, Bellarmino continúa su carta con las siguientes palabras: “Por lo que a mí respecta, no creeré en la existencia de tales pruebas hasta que me hayan sido mostradas”. El cardenal Bellarmino se expresaba de este modo a pesar de que ya conocía perfectamente los descubrimientos efectuados por Galileo gracias al empleo del telescopio, descubrimientos que habían aportado nuevas pruebas en favor de las tesis de Copérnico. Podemos pues preguntarnos qué pruebas habría considerado Bellarmino como “reales” frente al texto contenido en las Escrituras. Sea como fuere, era consciente, al menos en principio, de la posibilidad de una prueba que hiciera necesaria una reinterpretación de los textos. Sólo a partir de la segunda década del siglo XVII fue cuando las autoridades católicas

dieron un mayor peso al testimonio de las Escrituras, limitando así la capacidad de maniobra que había otorgado durante siglos a las disidencias especulativas.

Creo que la creciente adhesión a una interpretación literal de la Biblia que se esconde bajo la condena católica de Copérnico debe interpretarse en gran parte como una reacción frente a las presiones que soportó la Iglesia a causa de la revuelta protestante. De hecho, las doctrinas copernicanas fueron condenadas durante la Contrarreforma, en el preciso momento en que la Iglesia se veía más convulsionada por las reformas internas destinadas a responder a las críticas protestantes. Parece ser que la oposición a Copérnico constituyó, al menos en parte, una de tales reformas. Otra de las causas de la creciente hostilidad mostrada por la Iglesia a partir de 1610 frente al copernicanismo puede haber sido una comprensión tardía de las profundas implicaciones teológicas del movimiento terrestre. A lo largo del siglo XVI raramente se habían manifestado de forma explícita tales implicaciones, pero en 1600 fueron puestas de relieve en toda Europa con resonante clamor por la ejecución en la hoguera, en Roma, del filósofo y místico Giordano Bruno. Bruno no fue ejecutado por defender la teoría de Copérnico, sino por una serie de herejías teológicas relativas a su concepción de la Trinidad, herejías por las que ya habían sido ejecutados otros católicos con anterioridad. Bruno no fue, como tan a menudo se ha afirmado, un mártir de la ciencia, aunque para sus propósitos la teoría de Copérnico congeniaba muy bien con su concepción neoplatónica y democriteana de un universo infinito que contenía una infinidad de mundos generados por una fecunda divinidad. Había intentado introducir las teorías copernicanas en Inglaterra y en otros países del continente, pero les había dado una significación que no puede encontrarse en las páginas del *De revolutionibus* (cf. más adelante, cap. 7). Ciertamente la Iglesia recelaba del copernicanismo de Bruno, y quizá también este recelo estimulara su reacción.

Pero sean cuales fueren las razones, lo cierto es que en 1616 la Iglesia convirtió el copernicanismo en un problema doctrinal, y es éste el momento en que tienen sus inicios los peores excesos de la batalla contra el

movimiento terrestre, tales como la condena de las opiniones copernicanas, la abjuración y “encarcelamiento” de Galileo y la excomunión y apartamiento de sus cargos de eminentes católicos partidarios de la teoría de Copérnico. Una vez puesto en marcha el aparato represor de la Inquisición contra el copernicanismo era muy difícil pararlo. Hasta 1822 la Iglesia no autorizará la impresión de libros en los que se haga referencia al movimiento de la tierra como realidad física, cuando ya todo el mundo, menos las sectas protestantes de más rígida ortodoxia, estaba convencido de ello desde hacía largo tiempo. La adhesión oficial de la Iglesia a la inmovilidad de la tierra fue un golpe irreparable para la ciencia católica y más tarde para el prestigio de la propia Iglesia. Ningún episodio dentro de la historia católica ha sido tan justa y frecuentemente citado contra la Iglesia como la patética abjuración del viejo Galileo, obtenida por la fuerza en 1633.

La abjuración de Galileo marca la cima de la batalla contra el copernicanismo y, por una ironía, el ataque decisivo no se libró hasta un momento en que el desenlace de la lucha era perfectamente previsible. Hasta 1610, año en que se constituye y organiza la oposición a la doctrina de Copérnico, todo el mundo, excepción hecha de los abogados más fanáticos del movimiento terrestre, se habría visto forzado a admitir que las pruebas en favor de Copérnico eran débiles, mientras que las esgrimidas en su contra eran de gran solidez. Quizá entonces hubiera podido ser abandonada la tesis central del *De revolutionibus*, pero en 1633 no era éste el caso. Nuevas y más sólidas pruebas habían sido descubiertas; la situación relativa de las fuerzas en batalla había cambiado. Incluso antes de que se produjera la abjuración de Galileo, la nueva prueba había transformado la oposición al copernicanismo en una desesperada acción de retaguardia. El resto del presente capítulo examina la nueva prueba extraída del cielo por tres de los inmediatos sucesores de Copérnico.

TYCHO BRAHE

Si Copérnico fue el principal astrónomo europeo de la primera mitad del siglo XVI, Tycho Brahe (1546-1601) fue la autoridad astronómica más preeminente de la segunda. Juzgando estrictamente en función de su respectiva competencia técnica, Brahe es el más grande de los dos. Pero tal comparación tiene escaso sentido, pues cada uno de ellos tenía fuerzas y flaquezas diferentes que difícilmente se habrían fusionado de forma natural en una sola personalidad. Por otro lado, tanto las virtudes del uno como las del otro eran indispensables para la revolución copernicana. Brahe, en tanto que teórico de la cosmología y la astronomía, mostraba una linea de pensamiento relativamente tradicional. Su trabajo apenas da muestra alguna de la inquietud neoplatónica por las armonías matemáticas que había sido el instrumento de la ruptura de Copérnico con la tradición ptolemaica y que, en un principio, constituyó la única auténtica evidencia en favor del movimiento de la tierra. De hecho, se opuso a Copérnico a lo largo de toda su vida, y su inmenso prestigio contribuyó a retardar la conversión de los astrónomos a la nueva teoría.

No obstante, aunque no haya aportado ningún nuevo concepto astronómico, Brahe fue el responsable de cambios de enorme importancia en las técnicas de observación astronómica y en los niveles de precisión que cabía exigir a los datos astronómicos. Fue el más grande de todos los observadores a simple vista; diseñó y construyó un gran número de nuevos instrumentos, más grandes, más sólidos y mejor calibrados que los hasta entonces en uso; buscó y corrigió con enorme ingeniosidad muchos errores debidos al empleo de instrumentos imprecisos, estableciendo de este modo un conjunto de nuevas técnicas para recoger una información precisa sobre las posiciones de estrellas y planetas. Y, más importante aún que todo cuanto acabamos de indicar, Brahe fue quien inauguró la técnica de efectuar observaciones regulares de los planetas en su curso a través de los cielos, modificando la práctica tradicional de observarlos tan sólo cuando estaban situados en algunas configuraciones particularmente favorables. Las modernas observaciones efectuadas con la ayuda del telescopio indican que, cuando Brahe tomaba especial cuidado en determinar la posición de una estrella fija, sus datos poseían un error de un minuto de arco, resultado

fenomenal para una observación a simple vista. La precisión de sus observaciones de las posiciones de los planetas parece haber sido por lo general del orden de los 4' de arco, precisión más de dos veces superior a la alcanzada por los mejores observadores de la antigüedad. No obstante, más importante aún que la precisión de sus observaciones particulares, fue la fiabilidad y alcance de todo el conjunto de datos que acumuló. Brahe y los discípulos que formó libraron a la astronomía europea de su dependencia frente a los datos de la antigüedad, eliminando con ello numerosos problemas astronómicos aparentes derivados de la baja calidad de las mediciones disponibles. Sus observaciones permitieron un nuevo planteamiento del clásico problema de los planetas, prerrequisito para su futura resolución, pues ninguna teoría planetaria hubiera sido capaz de hacer compatibles entre sí los datos empleados por Copérnico.

Datos exactos, numerosos y puestos al día, son la contribución esencial de Brahe a la resolución del problema de los planetas. Sin embargo, desempeñó otro y más importante papel en la revolución copernicana al elaborar un sistema astronómico que muy pronto reemplazó al ptolemaico, agrupando a su entorno a aquellos astrónomos aventajados que, lo mismo que el propio Brahe, no podían aceptar el movimiento de la tierra. Gran parte de los argumentos que emplea para refutar la innovación de Copérnico son los usuales, aunque los desarrolla de forma más detallada que la mayor parte de sus contemporáneos. Brahe asignó particular importancia al inmenso espacio que la teoría copernicana abría entre la esfera de Saturno y la de las estrellas sólo para dar cuenta de la ausencia de movimiento paraláctico observable. El propio Brahe había buscado dicho paralaje con la ayuda de sus nuevos y perfeccionados instrumentos, pero, al no encontrarlo, se vio forzado a rechazar la idea de un movimiento de la tierra. La única alternativa compatible con sus observaciones habría impuesto que la distancia de Saturno a la esfera de las estrellas fuera setecientas veces mayor que la de Saturno al sol.

Pero Brahe era un astrónomo de primer orden. A pesar de que rechazaba la posibilidad de un movimiento terrestre, no podía ignorar por completo las armonías matemáticas que el *De revolutionibus* había introducido en el seno

de la astronomía. Dichas nuevas armonías no le convirtieron al copernicanismo —según Brahe, no aportaban una prueba suficientemente sólida que contrapesara las dificultades inherentes al movimiento de la tierra—, pero por lo menos debieron acrecentar su desacuerdo con respecto al sistema ptolemaico, que también rechazó en favor de un tercer sistema de su propia invención. El sistema de Brahe, denominado "ticónico", se halla representado en la figura 37. En él la tierra sigue inmovilizada en el centro geométrico de la esfera estelar, cuya rotación cotidiana da razón del movimiento diurno de las estrellas. Lo mismo que en el sistema ptolemaico, el sol, la luna y los planetas son arrastrados hacia el oeste junto con las estrellas gracias al movimiento diurno de la esfera exterior, gozando por otra parte de los movimientos adicionales hacia el este que les son propios. Estos movimientos orbitales vienen representados por círculos en el diagrama adjunto, si bien el sistema ticónico completo precisa también de epiciclos menores, excéntricas y ecuantes. Los círculos del sol y de la luna tienen por centro la tierra; hasta aquí el sistema no difiere en lo más mínimo del de Ptolomeo. Pero el centro de las otras cinco órbitas planetarias restantes ha dejado de estar ocupado por la tierra para adjudicárselo el sol. El sistema de Tycho Brahe es una extensión, aunque quizás inconsciente, del sistema de Heráclides, quien atribuía a Mercurio y a Venus órbitas centradas en el sol.

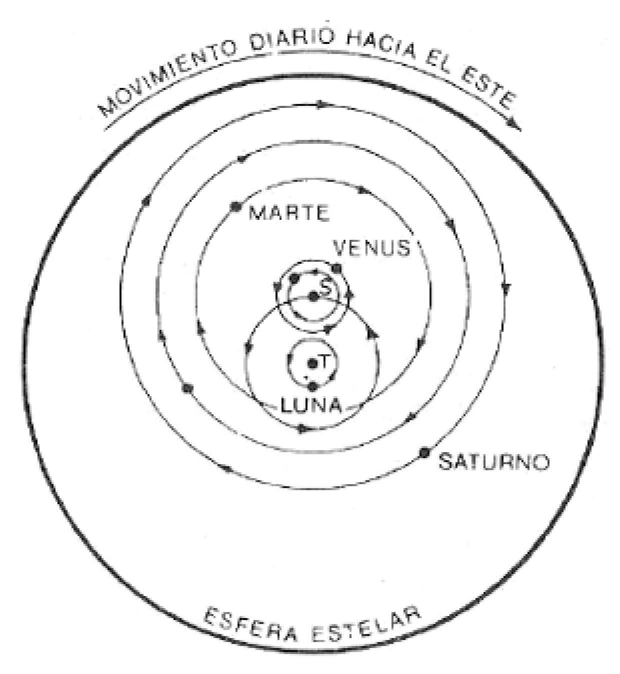


FIGURA 37. — El sistema ticónico. La tierra ocupa una vez más el centro de una esfera estelar en rotación, mientras que la luna y el sol se mueven sobre sus viejas órbitas ptolemaicas. Sin embargo, los otros planetas están situados sobre epiciclos cuyo centro común es el sol.

El rasgo característico e históricamente significativo del sistema ticónico es su adecuación como solución de compromiso a los problemas planteados por el *De revolutionibus*. Los principales argumentos esgrimidos contra Copérnico se desvanecen al mantener la tierra inmóvil en el centro del universo. De este modo, Brahe reconcilia con su propuesta las Escrituras, las leyes del movimiento y la ausencia de paralaje estelar sin tener por ello que sacrificar ni una sola de las principales armonías matemáticas de Copérnico. El sistema ticónico es, de hecho, equivalente al de Copérnico desde el punto de vista matemático. La determinación de distancias, las anomalías aparentes de los planetas inferiores, así como otras nuevas armonías que habían convencido a Copérnico del movimiento terrestre, quedan perfectamente preservadas en el sistema de Tycho Brahe.

Las armonías del sistema ticónico pueden ser desarrolladas por separado y en detalle con la ayuda de las mismas técnicas empleadas en la exposición del sistema copernicano, pero para nuestros objetivos presentes bastará con demostrar de forma abreviada la equivalencia matemática de ambos sistemas. Supongamos que la esfera estelar representada en la figura 37 se

expanda hasta tal punto que un observador situado sobre el sol en movimiento ya no pueda observar paralaje estelar alguno desde puntos opuestos de la órbita solar. Dicha expansión no afecta para nada la explicación matemática del movimiento de los planetas dentro del sistema. Imaginemos ahora que en el interior de esta dilatada esfera estelar los diferentes planetas son arrastrados a lo largo de sus órbitas por un mecanismo de relojería semejante al que se indica de forma esquematizada para la tierra, el sol y Marte en la figura 38*a*. En este diagrama, el sol está unido a la tierra central mediante un brazo de longitud constante que lo hace girar alrededor de ésta en sentido inverso al de las manecillas del reloj, mientras que Marte se ve arrastrado por el sol gracias a otro brazo de longitud constante que lo desplaza a su alrededor en el sentido de las agujas del reloj. Puesto que la longitud de los brazos permanece constante a lo largo del movimiento, este mecanismo de relojería producirá exactamente las órbitas circulares indicadas en la figura 37.

Imaginemos ahora que, sin modificar el mecanismo que mueve los brazos de la figura 38*a*, el sistema conjunto se desplace de tal forma que, mientras los brazos siguen girando como antes, esta vez el sol ocupa la posición central inmóvil que en el caso anterior correspondía a la tierra (figura 38*b*). Los brazos tienen idéntica longitud que en el caso precedente y son arrastrados por el mecanismo con idéntica velocidad, con lo que, por consiguiente, mantienen las mismas posiciones *relativas* en todos y cada uno de los instantes. La geometría del sistema formado por la tierra, el sol y Marte en la figura 38*a* se conserva en su totalidad en la disposición que adoptan los elementos integrantes en la figura 38*b*, puesto que, al cambiar exclusivamente el punto fijo del mecanismo, está claro que todos los movimientos relativos deben ser idénticos.

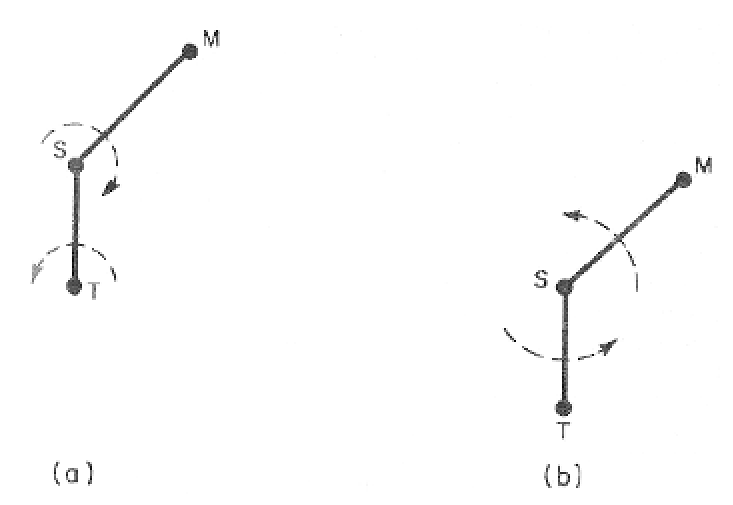


FIGURA 38. — Equivalencia geométrica del sistema de Tycho Brahe (*a*) y del sistema de Copérnico (*b*). En (*a*) el sol *S* es arrastrado por el brazo rígido *TS* en su movimiento hacia el este alrededor de la tierra inmóvil *T*. Simultáneamente, el planeta Marte *M* se ve arrastrado hacia el oeste alrededor de *S* a causa de la rotación regular del brazo *SM*. Puesto que *TS* gira más deprisa que *SM*, el movimiento total de Marte está dirigido hacia el este salvo en el breve periodo en que *SM* se cruza con *TS*. El diagrama (*b*) muestra los mismos brazos girando alrededor del sol inmóvil *S*. Las *posiciones relativas* de *T*, *S* y *M* son idénticas en ambos esquemas, situación que se mantiene mientras ambos diagramas giran. En particular, nótese que en (*b*) también debe decrecer el ángulo *TSM*, tal como sucede en (*a*), pues *TS* gira alrededor del sol con velocidad superior a la que lo hace *SM*.

Ahora bien, los movimientos generados por el mecanismo de la figura 38*b* son los propuestos en la teoría copernicana; es decir, los brazos de longitud fija del segundo diagrama arrastran a la tierra y a Marte alrededor del sol a lo largo de órbitas circulares idénticas a las descritas por Copérnico. Puede demostrarse la equivalencia general de ambos sistemas si consideramos que el mecanismo hipotético expuesto en la figura 38 incluye la totalidad de los planetas y repetimos la misma demostración. Si se prescinde de los epiciclos menores y las excéntricas, que no aparecen para nada en las armonías del sistema de Copérnico, el sistema ticónico se transforma en el copernicano con sólo mantener fijo el sol en lugar de la tierra. Los movimientos relativos de los planetas son los mismos en ambos sistemas, con lo que las armonías quedan totalmente preservadas. Desde un punto de vista matemático, la única diferencia posible entre ambos sistemas es la aparición de un movimiento paraláctico de las estrellas, aspecto que queda eliminado desde un primer momento por dilatación de la esfera estelar hasta un punto en que se haga imperceptible el paralaje.

El sistema ticónico tienen sus propias incongruencias: la mayor parte de los planetas se hallan descentrados, el centro geométrico del universo ha dejado de ser el centro de la mayoría de los movimientos celestes y es muy difícil imaginar un mecanismo físico que pueda producir, aunque sólo sea de forma aproximada, movimientos planetarios como los propuestos por Brahe. Así pues, el sistema ticónico no convenció a los escasos astrónomos neoplatónicos que, como Kepler, se sintieron atraídos por el sistema de Copérnico a causa de la gran simetría que encerraba. No obstante, se inclinaron a su favor la mayor parte de los más competentes astrónomos no-copernicanos de la época, pues ofrecía la posibilidad de escapar a un dilema ampliamente experimentado: mantenía las ventajas matemáticas del sistema de Copérnico suprimiendo sus inconvenientes físicos, cosmológicos y teológicos. En este aspecto reside la auténtica importancia del sistema ticónico; era un compromiso casi perfecto y, retrospectivamente, parece deber su existencia a la intensa necesidad de un tal compromiso. Así pues, el sistema ticónico aparece como un derivado inmediato del *De revolutionibus*.

El propio Tycho Brahe habría negado esta influencia. Afirmaba que su sistema nada debía al de Copérnico, aunque difícilmente podía tener conciencia plena de las presiones que operaban sobre él y sus contemporáneos. Ciertamente, Brahe conocía tanto la astronomía ptolemaica como la copernicana antes de elaborar su propio sistema, así como estaba advertido de la difícil situación que debía resolver su nueva teoría. El éxito inmediato del sistema de Tycho Brahe nos da un índice de la fuerza y extensión de las necesidades a las que respondía. El hecho de que otros dos astrónomos le disputaran la prioridad del descubrimiento del sistema, declarando haber trabajado por su cuenta en la búsqueda de parecidas soluciones de compromiso, proporciona una prueba suplementaria del papel desempeñado por el *De revolutionibus* y de la importancia de la corriente de opinión entre los astrónomos que condujo a la génesis del sistema ticónico. Brahe y su sistema son el primer ejemplo de una de las grandes generalizaciones con que hemos cerrado el capítulo

precedente: el *De revolutionibus* transformó la astronomía al plantear nuevos problemas a todos los astrónomos.

Las críticas de Brahe a la obra de Copérnico y la solución de compromiso que dio al problema de los planetas muestra que era incapaz, lo mismo que la mayor parte de los astrónomos de su época, de romper con los esquemas de pensamiento tradicionales respecto al problema del movimiento de la tierra. Tycho se alinea en las nutridas filas conservadoras de los sucesores de Copérnico. No obstante, su obra no tuvo repercusiones de carácter conservador. Bien al contrario, tanto su sistema como sus observaciones obligaron a sus sucesores a repudiar ciertos aspectos importantes del universo aristotélico-ptolemaico para conducirlos de forma progresiva hacia el campo copernicano. En primer lugar, el sistema de Tycho ayudó a los astrónomos a familiarizarse con los problemas matemáticos de la astronomía copernicana, dada la identidad de los sistemas de Brahe y Copérnico desde el punto de vista geométrico. Más aún, el sistema de Tycho Brahe, favorecido por sus observaciones de los cometas, de las que hablaremos más adelante, obligó a sus partidarios a abandonar las esferas de cristal que hasta entonces habían venido arrastrando a los planetas a lo largo de sus órbitas. En el sistema ticónico, como puede verse en la figura 37, la órbita de Marte interseca la órbita del sol. En consecuencia, ni Marte ni el sol pueden estar engarzados en esferas que los arrastren en su movimiento, pues, de lo contrario, ambos caparazones cristalinos deberían interpenetrarse y moverse uno a través del otro. De la misma manera, la esfera del sol atraviesa las esteras de Mercurio y Venus. Con todo, uno no se convierte en copernicano al abandonar las esferas cristalinas, pues el propio Copérnico había hecho uso de las mismas para explicar los movimientos de los planetas. Sin embargo, las esferas constituían un elemento esencial de la tradición cosmológica aristotélica y el principal obstáculo para el triunfo del copernicanismo. Toda ruptura con la tradición trabajaba a favor de los copernicanos, y el sistema ticónico, a pesar de todos sus componentes tradicionalistas, constituía una importante ruptura.

Más que su sistema propiamente dicho, lo que encaminó a sus contemporáneos hacia una nueva cosmología fueron las habilísimas observaciones de Brahe. Ellas fueron las bases esenciales sobre las que se sustentaría la obra de Kepler, quien convirtió la innovación de Copérnico en la primera solución realmente adecuada al problema de los planetas. Los nuevos datos recopilados por Brahe, aún antes de que fueran empleados para revisar el sistema de Copérnico, sugerían la necesidad de un nuevo enfoque fundamental para la cosmología clásica, pues ponían sobre el tapete la cuestión de la inmutabilidad de los cielos. Hacia finales de 1572, cuando Brahe estaba iniciando su carrera como astrónomo, apareció un nuevo cuerpo celeste en la constelación de Casiopea, diametralmente opuesta a la Osa Mayor con respecto al polo. Cuando fue observado por primera vez, dicho cuerpo tenía un brillo extraordinario, tan intenso como el de Venus en su máximo esplendor; durante los dieciocho meses sucesivos, este nuevo inquilino del cielo fue empalideciendo de forma progresiva, hasta que acabó por desaparecer completamente a comienzos de 1574. El nuevo visitante atrajo a lo largo y ancho de Europa el interés de todos, sabios y profanos, desde el momento de su aparición. No podía tratarse de un cometa, el único tipo de aparición celeste ampliamente reconocido por astrónomos y astrólogos, pues el objeto en cuestión no tenía cola y siempre ocupaba idéntica posición sobre la esfera de las estrellas. Sólo podía tratarse de un prodigio; los astrólogos redoblaron su actividad; en todas partes los astrónomos consagraron sus observaciones y escritos a la “nueva estrella” aparecida en los cielos.

La palabra “estrella” es la clave de la significación astronómica y cosmológica de este nuevo fenómeno. Si era una estrella, entonces habían cambiado los cielos inmutables y quedaba en entredicho la oposición fundamental entre la región supralunar y la tierra corruptible. Si era una estrella, era mucho más fácil aceptar la idea de una tierra planetaria, pues el carácter efímero y transitorio de las cosas terrestres acababa de ser descubierto en el seno de los propios cielos. Brahe y los más expertos astrónomos de su generación acabaron aceptando que el nuevo visitante era una estrella. Observaciones como la que nos ilustra la figura 39 indicaban

que el objeto en cuestión no podía estar situado por debajo de la esfera de la luna, ni incluso en una zona próxima a la región sublunar. Así pues, lo más probable es que se hallara ubicado entre las estrellas, ya que se le veía mover a través de las mismas. Acababa de ser descubierto otro fenómeno que conmocionaba los cimientos cosmológicos.

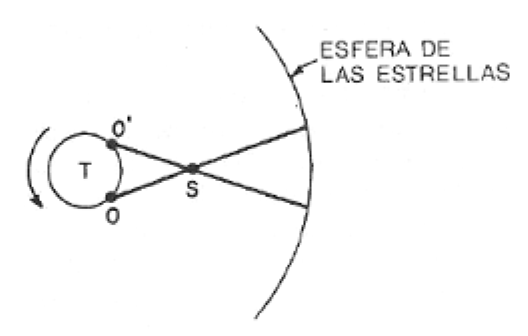


FIGURA 39. — Paralaje diario de un cuerpo situado fuera de la esfera estelar. Si *S* se halla ubicado entre la tierra y la esfera de las estrellas, dos observadores terrestres situados en *O* y *O'* lo verán proyectado sobre la esfera estelar en dos posiciones distintas. Pero no es necesario suponer la existencia de dos observadores para constatar la importancia del fenómeno de paralaje. La rotación de la tierra hacia el este (o la rotación equivalente hacia el oeste del cuerpo observado y de la esfera de las estrellas) transporta al observador desde *O* hasta *O'* en seis horas; como resultado de este movimiento el cuerpo *S* parece cambiar constantemente de posición, y al cabo de 24 horas recupera su posición inicial con respecto a las estrellas. Si *S* estuviera a una distancia similar a la que nos separa de la luna, su desplazamiento aparente sería de alrededor de 1° cada seis horas transcurridas. Cuanto más alejados están de la tierra, menores son los desplazamientos aparentes que presentan los cuerpos celestes.

Con la ayuda de instrumental moderno, la técnica que acabamos de indicar se revela de gran utilidad para determinar las distancias que nos separan de la luna y los planetas, pero las observaciones efectuadas a simple vista no son suficientemente precisas para poderla aplicar. Las dimensiones de la luna y su rápido movimiento orbital enmascaran el efecto paraláctico, mientras que los planetas se hallan demasiado alejados de la tierra como para poder apreciarlo a simple vista.

El descubrimiento en el siglo XVI de la mutabilidad de los cielos quizá sólo hubiera tenido un efecto relativo si la única prueba de cambio en la región supralunar hubiera sido la nueva estrella, o nova, de 1572. Se trataba de un fenómeno pasajero; quienes se inclinaban por rechazar los datos de Brahe no podían ser refutados; cuando tales datos fueron publicados, la estrella ya había desaparecido de los cielos, y siempre podrían haberse encontrado observadores menos minuciosos que advirtieran un paralaje suficiente como para situar la nova por debajo de la luna. Felizmente, los

cometas cuidadosamente observados por Brahe en 1577, 1580, 1585, 1590, 1593 y 1596 proporcionaban pruebas suplementarias y continuadas del cambio en la región supralunar. Tampoco en estos casos se pudo observar ningún paralaje mensurable y, por consiguiente, también los cometas fueron ubicados más allá de la esfera lunar, pasando a ser cuerpos que se movían en el seno de la región precedentemente llenada por las esferas cristalinas.

Los argumentos de Brahe sobre los cometas, lo mismo que las observaciones de la nova, no lograron convencer a todos sus contemporáneos. Durante las primeras décadas del siglo XVII, Brahe fue atacado muy a menudo, en ocasiones incluso con tanta acritud como Copérnico, por quienes creían que otros datos probaban que los cometas y las novae eran fenómenos sublunares y que, por lo tanto, la inviolabilidad de los cielos quedaba totalmente a cubierto. Pero Brahe consiguió convencer a un gran número de astrónomos de la existencia de un defecto de base en la visión aristotélica del mundo y, por encima de todo, desarrolló un tipo de argumentación gracias al cual quienes permanecieran escépticos podían verificar constantemente sus conclusiones. Con frecuencia aparecen cometas bastante brillantes como para ser observados a simple vista, por lo que una vez deducido de la observación y ampliamente debatido su carácter supralunar, ya no era posible ignorar indefinidamente o distorsionar la prueba que aportaban los cometas a la cuestión de la inmutabilidad de los cielos. Una vez más triunfaban los partidarios de Copérnico.

De un modo u otro, durante el siglo que siguió a la muerte de Copérnico, todas las novedades de la observación y la teoría astronómicas, fuesen o no obra de copernicanos, venían a confirmar la teoría del maestro. Dicha teoría, deberíamos decir, probaba su fecundidad. No obstante, al menos en lo que concierne a los cometas y a las novae, lo hacía de forma asaz extraña, pues las observaciones de tales cuerpos nada tienen que ver con el movimiento de la tierra. Un discípulo de Ptolomeo habría podido efectuarlas e interpretarlas con tanta facilidad como un copernicano. En sentido estricto, no eran subproductos por línea directa del *De revolutionibus*, al contrario de lo que cabe afirmar con respecto al sistema ticónico.

Con todo, no pueden considerarse como totalmente independientes del *De revolutionibus*, o al menos del clima intelectual en que éste fue concebido. Con anterioridad a las últimas décadas del siglo XVI habían sido observados cometas con cierta frecuencia. También, aunque fuera más difícil su observación a simple vista, debían haberse observado alguna vez que otra nuevas estrellas antes de la época de Brahe; una nueva nova apareció el año antes de su muerte, y una tercera en 1604. Por otro lado, téngase en cuenta que no eran en absoluto necesario los perfeccionados instrumentos de Brahe para descubrir el carácter supralunar de novae y cometas; podía detectarse un desplazamiento paraláctico del orden de 1° sin recurrir para nada a dicho instrumental y los contemporáneos de Tycho habían deducido independientemente el carácter supralunar de los cometas con sólo la ayuda de instrumentos conocidos desde la más remota antigüedad. Al copernicano Maestlin le bastó un pedazo de hilo para deducir que la nova de 1572 estaba situada más allá de la luna. En pocas palabras, las observaciones gracias a las cuales Brahe y sus contemporáneos aceleraron la caída de la cosmología tradicional y el ascenso del copernicanismo habrían podido ser efectuadas en cualquier momento desde la más remota antigüedad. Los fenómenos e instrumentos necesarios existían desde dos milenios antes del nacimiento de Tycho Brahe, pero las observaciones no se efectuaron o, en caso contrario, no fueron correctamente interpretadas. Fenómenos conocidos desde épocas remotas cambiaron rápidamente de sentido y significación durante la segunda mitad del siglo XVI. Tales cambios resultan de todo punto incomprensibles sin hacer referencia, al nuevo clima surgido en el pensamiento científico, uno de cuyos primeros y más descollantes representantes es Copérnico. Tal como habíamos sugerido en las últimas líneas del precedente capítulo, el *De revolutionibus* representaba un mojón del que arrancaba un nuevo camino sin posibilidad de retorno.

JOHANNES KEPLER

La obra de Brahe indica hasta qué punto era difícil a partir de 1543 para los adversarios de Copérnico, al menos para los más competentes y honestos, contribuir en la promoción de reformas astronómicas y cosmológicas de primer orden. Estuvieran o no de acuerdo con Copérnico, éste había cambiado por completo su campo de trabajo. No obstante, la obra de un anticopernicano como Brahe no muestra el verdadero alcance de tales cambios. Las investigaciones de Johannes Kepler (1571-1630), el más célebre de los colegas de Brahe, constituyen un mejor índice de los nuevos problemas que se le planteaban a la astronomía después de la desaparición de Copérnico. Kepler fue copernicano toda su vida. Parece ser que fue Maestlin quien le convirtió al sistema de Copérnico mientras Kepler estudiaba en la universidad protestante de Tubinga, y su fe en el mismo, adquirida durante sus días de estudiante, ya no desapareció jamás. A lo largo de toda su vida se referirá, con los típicos acentos rapsódicos del neoplatonismo renacentista, a la pertinencia del papel que Copérnico había atribuido al sol. Su primer libro importante, el *Misterio Cosmográfico*, publicado en 1596, se abría con una amplia defensa del sistema copernicano, mostrando un especial énfasis en todos los argumentos derivados de la armonía, que ya hemos discutido en el capítulo 5, y añadiendo otros nuevos de su propia cosecha. Entre estos últimos, Kepler afirma que la proposición de Copérnico explica por qué, en la astronomía ptolemaica, el epiciclo de Marte era mucho mayor que el de Júpiter y el de Júpiter mayor que el de Saturno, que la astronomía heliocéntrica muestra las razones de que sólo el sol y la luna, de entre todos los astros errantes, carezcan de retrogradación, etc. Los argumentos de Kepler son los mismos que los de Copérnico, aunque más numerosos, pero Kepler, contrariamente a Copérnico, los desarrolla con amplitud y acompañándolos de detallados diagramas. Por primera vez, quedaba demostrada toda la fuerza de los argumentos matemáticos dentro de la nueva astronomía.

No obstante, si bien Kepler aprobaba plenamente la concepción de un sistema planetario heliocéntrico, se mostró muy crítico en cuanto al sistema matemático elaborado por Copérnico. En sus obras, Kepler insiste una y otra vez en que Copérnico jamás había sido capaz de reconocer la plena

riqueza de su propio trabajo y que, una vez dado el audaz primer paso de intercambiar las posiciones del sol y la tierra, había permanecido en exceso apegado a Ptolomeo al desarrollar los detalles de su sistema. Kepler era consciente, de forma muy clara y con un cierto malestar, de los incongruentes residuos arcaicos encerrados en el *De revolutionibus*, y resolvió eliminarlos sacando todas las consecuencias del nuevo estatuto de la tierra: un planeta, como los otros, gobernado por el sol.

Copérnico no había conseguido plenamente tratar a la tierra como a cualquier otro de los planetas del sistema heliocéntrico. Contrariamente a lo que pueda hacer suponer el esbozo cualitativo presentado en el Libro Primero del *De revolutionibus*, la exposición matemática del sistema planetario contenida en los restantes libros atribuía varias funciones particulares a la tierra. Así, por ejemplo, en el sistema de Ptolomeo, los planos de todas y cada una de las órbitas planetarias habían sido construidos de modo que se intersecaran en el centro de la tierra, y Copérnico conservó tal función para la tierra mediante un nuevo truco, trazando los planos de las órbitas de modo que se intersecaran en el centro de la órbita terrestre. Kepler insistió en que, si el sol regía todos los planetas y la tierra no gozaba de ningún estatuto particular, los planos de las diferentes órbitas planetarias debían cortarse sobre el sol. En consecuencia, proyectó de nuevo el sistema copernicano y, con ello, llevó a cabo el primer progreso significativo desde Ptolomeo en la explicación de las desviaciones de los planetas a norte y sur de su eclíptica. Kepler había mejorado el sistema matemático de Copérnico aplicándole estrictamente la doctrina copernicana.

La misma insistencia sobre la identidad de estatuto de todos los planetas permitió a Kepler eliminar un buen número de pseudoproblemas que habían deformado la obra de Copérnico. Por ejemplo, éste no creía que las excentricidades de Mercurio y Venus cambiaban lentamente y había añadido una serie de círculos suplementarios a su sistema para explicar dichas variaciones. Kepler demostró que tal cambio aparente sólo se debía a una incongruencia en la definición de excentricidad dada por Copérnico. En efecto, en el *De revolutionibus* la excentricidad de la órbita terrestre venía medida a partir del sol (es la distancia SO_T en la figura 34*a*, p. 180)

mientras que la excentricidad de las órbitas restantes lo era a partir del centro de la órbita terrestre (en la figura 34*b* la excentricidad de Marte es O_TO_M). Kepler insistía en que dentro de un universo copernicano todas las excentricidades de las órbitas planetarias deben ser calculadas de idéntica forma y a partir del sol. Cuando se integró este nuevo método al sistema desaparecieron muchas de las variaciones aparentes de excentricidad, con lo que quedó notablemente reducido el número de círculos necesarios para calcular las posiciones planetarias.

Los ejemplos anteriores muestran hasta qué punto Kepler se esforzaba en adaptar las técnicas matemáticas excesivamente ptolemaicas de Copérnico a la visión copernicana de un universo dominado por el sol. Fue precisamente con su perseverancia en tal camino con la que Kepler acabó por resolver el problema de los planetas, transformando el embarazoso sistema de Copérnico en una técnica extremadamente simple y precisa para calcular las posiciones de los planetas. Kepler efectuó sus descubrimientos esenciales estudiando el movimiento de Marte, un planeta cuyas excentricidad y proximidad a la tierra eran responsables de las irregularidades que habían constituido un desafío permanente a la ingeniosidad de los astrónomos matemáticos. Ptolomeo había sido incapaz de explicar el movimiento de Marte de forma tan satisfactoria como el de los restantes planetas y Copérnico no había aportado nada nuevo al respecto. Brahe había intentado hallar una nueva solución, a cuyo fin emprendió una larga serie de observaciones especiales, pero tuvo que renunciar a su propósito después de haber tropezado con las grandes dificultades que planteaba el problema. Kepler, que trabajó junto a Brahe durante los últimos años de la vida de éste, heredó las nuevas observaciones y, a la muerte de Tycho, emprendió el ataque al problema por su propia cuenta.

Fue una labor inmensa que ocupó la mayor parte del tiempo de Kepler durante cerca de diez años. Debían calcularse dos órbitas, a saber, la propia órbita de Marte y la órbita de la tierra, lugar desde donde es observado el movimiento de Marte. Kepler se vio obligado una y otra vez a cambiar la combinación de círculos que empleaba para calcular tales órbitas. Ensayó y

rechazó una tras otra todas las combinaciones que no proporcionaban resultados acordes con las brillantes observaciones de Brahe. Cualquiera de estas soluciones intermedias era mucho mejor que los sistemas propuestos por Ptolomeo o Copérnico; algunas daban errores inferiores a los 8' de arco, es decir, muy por debajo de los de las observaciones antiguas. La mayor parte de los sistemas rechazados por Kepler habrían satisfecho a sus predecesores, pero no debe olvidarse que éstos no tenían a su disposición los datos observacionales de Tycho Brahe, cuya precisión era del orden de los 4' de arco. La bondad divina, dice Kepler, nos ha dado en Tycho Brahe un observador de tan gran valor que debemos aceptar con agradecimiento este presente y hacer uso de él para descubrir la verdadera estructura de los movimientos celestes.

Una larga serie de infructuosos ensayos convenció a Kepler de que ningún sistema fundamentado en una composición de círculos podría resolver el problema. La clave debía estar, según él, en alguna otra figura geométrica. Probó con diversos tipos de óvalos, pero con ninguno de ellos conseguía eliminar las discrepancias entre sus tentativas teóricas y las observaciones. Entonces, por puro azar, reparó en que tales discrepancias variaban según una ley matemática familiar, estudiando esta regularidad descubrió que podían reconciliarse teoría y observación si se consideraba que los planetas se desplazaban con velocidad variable, regida por una ley simple que también especificó, sobre órbitas elípticas. Éstos son los resultados que Kepler expuso en su *Astronomia nova*, publicada por primera vez en Praga en 1609. Una técnica matemática más simple que todas las empleadas desde Apolonio e Hiparco conducía a predicciones enormemente más precisas que cualquiera de las efectuadas hasta entonces. Por fin había sido resuelto el problema de los planetas, y lo había sido en el marco de un universo copernicano.

Las dos leyes que constituyen la solución final de Kepler (y la nuestra) al problema de los planetas están descritas en detalle en la figura 40. Los planetas se desplazan a lo largo de elipses, uno de cuyos focos está ocupado por el sol. Ésta es la primera ley de Kepler. La segunda ley se deriva inmediatamente de la primera y completa la descripción contenida en ésta:

la velocidad orbital de cada planeta varía de tal forma, que una línea que una el sol con el planeta en cuestión barre áreas iguales, sobre la elipse, en intervalos de tiempo iguales. Al sustituir las órbitas circulares, comunes a las astronomías ptolemaica y copernicana, por elipses y la ley del movimiento uniforme alrededor del centro, o de un punto situado en sus proximidades, por la ley de las áreas, se desvanece toda necesidad de excéntricas, epiciclos, ecuantes y otros elementos *ad hoc*. Por primera vez, una curva geométrica simple y una ley de velocidades son suficientes para predecir las posiciones de los planetas. Por primera vez las predicciones teóricas están en perfecto acuerdo con los datos obtenidos por observación.

Así pues, el sistema astronómico copernicano heredado por la ciencia moderna es el fruto conjunto de los trabajos de Kepler y Copérnico. El sistema de seis elipses diseñado por Kepler hacía operativa y viable la astronomía heliocéntrica, poniendo de relieve a un mismo tiempo la economía y la riqueza implícita de la innovación introducida por Copérnico. Debemos intentar descubrir qué elementos se requerían para permitir esta transición desde el sistema copernicano a su moderna forma kepleriana. Dos de los prerrequisitos necesarios para la obra de Kepler se hacen patentes desde un primer momento. Por un lado, el hombre que iniciara la búsqueda de órbitas más adecuadas para tratar la tierra como un simple planeta y hacer pasar los planos de todas las órbitas por el centro del sol debía ser, forzosamente, un copernicano convencido. Por otro, debía tener a su disposición los datos observacionales de Tycho Brahe. Los datos empleados por Copérnico y sus predecesores europeos estaban demasiado infectados de errores como para encontrar explicación en el marco de cualquier conjunto de órbitas simples; además, aun expurgados de sus errores, no hubiera bastado con tales datos. Observaciones menos precisas que las de Brahe habrían podido ser explicadas, tal como demostró el propio Kepler, mediante una combinación clásica de círculos. No obstante, el proceso por el que Kepler llegó a la deducción de sus famosas leyes depende de algo más que de la existencia de datos precisos y de la previa admisión del estatuto planetario para la tierra. Kepler era un ardiente neoplatónico. En consecuencia, creía que las leyes naturales simples son la

base de todos los fenómenos naturales y que el sol es la causa física de todos los movimientos celestes. Tanto sus más perdurables como sus más efímeras contribuciones a la astronomía están teñidas por estos dos aspectos de su, con frecuencia mística, fe neoplatónica.

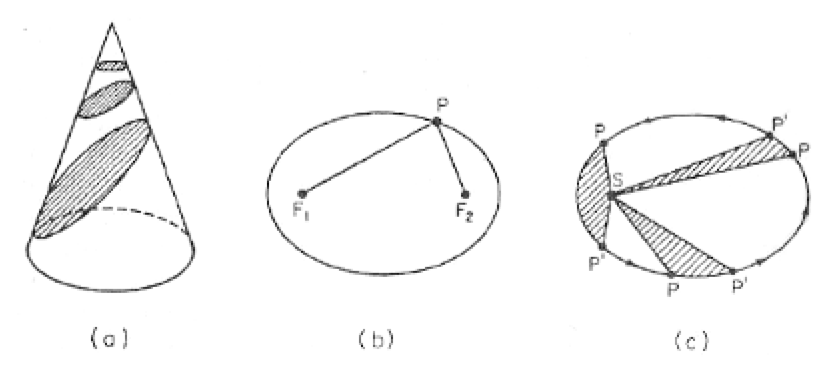


FIGURA 40. — Las dos primeras leyes de Kepler. Los diagramas (*a*) y (*b*) definen la elipse, la curva geométrica sobre la que deben moverse todos los planetas que obedecen la primera ley de Kepler. En (*a*) se define la elipse como sección producida por un plano al cortar un cono de base circular. Cuando dicho plano es perpendicular al eje del cono, la intersección de ambos es un círculo, caso particular de elipse. Cuando el plano está inclinado respecto al eje del cono, la curva de intersección es una elipse.

El diagrama (*b*) ofrece una definición más moderna y bastante más útil de la elipse. Si fijamos los dos extremos de un hilo sobre dos puntos F_1 y F_2 de un plano y hacemos que un lápiz *P* se mueva de tal forma que el hilo permanezca en todo momento estirado por completo, la curva que describirá la punta del lápiz es una elipse. Si se modifica la longitud del hilo o si se aumenta o disminuye la distancia existente entre los dos focos F_1 y F_2, quedará modificada la forma de la elipse, similarmente a cuanto sucede en el diagrama (*a*) al cambiar la inclinación del plano secante. La mayor parte de las órbitas planetarias son casi circulares y los focos de las correspondientes elipses se hallan muy próximos entre si.

El diagrama (*c*) ilustra la segunda ley de Kepler, la que rige la velocidad orbital. El sol está situado en uno de los focos de la elipse, tal como exige la primera ley, y se ha trazado una serie de rectas que lo unen con diferentes posiciones planetarias *P* y *P'* escogidas de tal forma que las áreas de los tres sectores *SPP'* son iguales entre sí. La segunda ley afirma que el planeta debe recorrer arcos *PP'* correspondientes a sectores con igual área en tiempos iguales. Cuando el planeta está cerca del sol, su velocidad debe ser relativamente grande para que la recta *SP* pueda barrer la misma área por unidad de tiempo que cuando dicha recta tiene una mayor longitud, es decir, cuando el planeta está más alejado del sol.

En un pasaje citado hacia el final del capítulo 4, Kepler describe el sol como “el único cuerpo que, en virtud de su dignidad y poder, parece a propósito […] para mover los planetas en sus órbitas, y digno de convertirse en la morada del propio Dios, por no decir en el primer motor”. Esta

convicción, junto a ciertas incoherencias intrínsecas discutidas anteriormente, fue la razón que le impulsó a rechazar el sistema ticónico. Tal idea también desempeñó un papel extremadamente importante en sus propias investigaciones, en especial en la deducción de su segunda ley. En su origen, la segunda ley es independiente de toda observación, si exceptuamos quizá las más burdas. Ante todo proviene de la intuición física kepleriana de que los planetas son arrastrados a lo largo de sus órbitas por los rayos de una fuerza motriz, el *anima motrix*, que emana del sol. Según Kepler, el efecto de dicha radiación debía quedar limitado al plano de la eclíptica en que se mueven todos los planetas, o como máximo a sus proximidades. Bajo tal supuesto, el número de rayos que chocaban contra un planeta y la correspondiente fuerza que le impulsaba a recorrer su órbita disminuían a medida que aumentaba la distancia entre el planeta y el sol. Cuando se doblara su distancia al sol, el número de rayos del *anima motrix* que llegarían al planeta sería la mitad (figura 41*a*) y, en consecuencia, la velocidad del planeta sobre su órbita equivaldría a la mitad de su velocidad orbital cuando se hallaba a la distancia original del sol. Un planeta, *P*, que se mueva alrededor del sol, *S*, según un círculo excéntrico (figura 41*b*) o cualquier otra curva cerrada, debe desplazarse con una velocidad inversamente proporcional a *SP*. El planeta alcanza la velocidad más elevada cuando se halla en su perihelio *p*, el punto de su órbita más próximo al sol; la velocidad más baja la alcanza al llegar a su afelio *a*, cuando el planeta se halla en su posición más alejada del sol. La velocidad del planeta al recorrer su órbita varía constantemente entre estos dos valores extremos.

Mucho antes de iniciar sus trabajos sobre las órbitas elípticas o de enunciar la ley de las áreas bajo su formulación moderna, Kepler ya había elaborado esta ley de velocidad inversamente proporcional a la distancia para reemplazar, a un mismo tiempo, la antigua ley del movimiento circular uniforme y la variante de Ptolomeo que permitía la existencia de un movimiento uniforme con respecto a un punto ecuante. Ciertamente Kepler "se sacó de la manga" esta primera ley de velocidades gracias a una extraña intuición —rápidamente arrumbada por sus sucesores— sobre las fuerzas que debían gobernar un universo solar. Por otro lado, este enunciado

primitivo de la ley de velocidades no es totalmente correcta. La ley de las áreas, la denominada segunda ley de Kepler, no es del todo equivalente a la que relaciona inversamente velocidades y distancias, siendo algo más precisos los resultados deducidos a partir de la primera de ellas. No obstante, cuando se emplean en el cálculo de las posiciones planetarias, ambas formulaciones de la ley de velocidades conducen a previsiones casi idénticas. Kepler creyó, equivocadamente, en la equivalencia de ambas leyes, empleándolas indistintamente a lo largo de toda su vida. A despecho de sus resonancias visionarias y poco ortodoxas, el primitivo enunciado neoplatónico de la ley de velocidades se reveló fundamental en las más fecundas investigaciones de Kepler.

Al contrario de cuanto hace referencia a su deducción de la ley de velocidades, el trabajo de Kepler sobre las órbitas elípticas se basó por completo en el más minucioso y completo estudio de las mejores observaciones astronómicas disponibles. Probó una tras otra una serie de órbitas, abandonándolas después que laboriosos cálculos mostraran su desacuerdo con los datos recopilados por Brahe. La escrupulosa tentativa de Kepler para ajustar sus órbitas teóricas a los datos objetivos de que disponía se cita muy a menudo como uno de los primeros ejemplos del método científico por excelencia. No obstante, tampoco la ley de las órbitas elípticas, conocida bajo el nombre de primera ley de Kepler, fue exclusivamente extraída de la observación y el cálculo. A menos que se suponga que las órbitas planetarias se cierran sobre sí mismas (conocimiento adquirido en época posterior a la de Kepler), se necesita una ley de velocidades para poder calcular la forma de aquellas a partir de datos obtenidos por observación a simple vista. Así pues, cuando analizaba las observaciones de Brahe, Kepler estaba haciendo uso constante de sus primitivas intuiciones neoplatónicas.

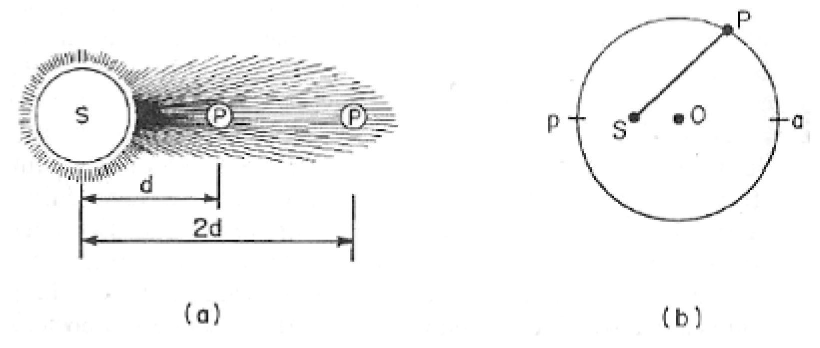


FIGURA 41. — La primitiva ley de velocidades enunciada por Kepler. El diagrama (*a*) muestra los rayos del *anima motrix* que emanan del sol, ilustrando la teoría física de la cual Kepler dedujo su ley. El diagrama (*b*) muestra en qué forma puede ser aplicada esta ley a un planeta que se mueva sobre una excéntrica.

La relación entre órbitas, ley de velocidades y observaciones quedaba enmascarada en nuestras primeras discusiones sobre la teoría astronómica porque los astrónomos de la antigüedad y de la Edad Media habían escogido de antemano una ley de velocidades simple. Con anterioridad a Kepler, los astrónomos suponían que cada uno de los círculos que contribuían a mover un determinado planeta a lo largo de su órbita debía efectuar su rotación de modo uniforme alrededor de un punto situado en el centro de la misma o muy cerca de él. Sin una hipótesis de este género nunca habría podido emprenderse la elaboración de órbitas ajustables a las observaciones, pues, en ausencia de una ley de velocidades, la especificación de una órbita da muy pocas o ninguna indicación sobre el lugar entre las estrellas que ocupará un planeta en un determinado instante. Ni la ley de velocidades ni las órbitas que rigen los movimientos planetarios pueden deducirse o contrastarse independientemente a partir de las observaciones. En consecuencia, cuando Kepler rechazó la vieja ley del movimiento uniforme, debía reemplazarla por otra o, de lo contrario, abandonar por completo los cálculos planetarios. De hecho, sólo rechazó la ley del movimiento uniforme una vez había elaborado su propia ley, y, con toda probabilidad, por tal motivo. Su intuición neoplatónica le indicaba que esta nueva ley era mucho más adecuada que su contrapartida antigua para regir los movimientos celestes en un universo dominado por el sol.

La deducción por parte de Kepler de la ley de velocidades inversamente proporcionales a las distancias atestigua su confianza en las armonías matemáticas tan bien como pueda hacerlo su fe en el papel causal desempeñado por el sol. Una vez desarrollada su idea del *anima motrix*, Kepler mantiene que ésta debe operar de la forma más simple compatible con la observación grosera. Por ejemplo, Kepler sabía que los planetas alcanzan su mayor velocidad cuando pasan por el perihelio, pero tenía pocos datos más, y ninguno cuantitativo, sobre los que fundamentar una ley de velocidades inversamente proporcionales a las distancias. La fe de Kepler en las armonías de los números y el papel desempeñado por tal creencia en su obra quedan de manifiesto de forma aún más acusada en otra de las leyes que de él ha heredado la astronomía moderna. Se trata de la denominada tercera ley de Kepler, enunciada durante 1619 en sus *Harmonices mundi*.

La tercera ley era una ley astronómica de un nuevo género. La primera y la segunda leyes keplerianas describen, tal como lo hacían las leyes de la astronomía antigua y medieval, el movimiento individual de un planeta sobre su órbita. En contrapartida, la tercera ley establece una relación entre las velocidades de planetas situados en órbitas diferentes. Esta ley afirma que, si T_1 y T_2 son los respectivos períodos que tardan dos planetas en completar sus correspondientes revoluciones y R_1 y R_2 las distancias medias de tales planetas al sol, la razón de los cuadrados de los períodos orbitales es igual a la razón de los cubos de las distancias medias al sol, o sea $(T_1T_2)^2 = (R_1R_2)^3$. Se trata de una ley fascinante, pues pone de manifiesto una regularidad en el sistema planetario jamás percibida hasta entonces. Sin embargo ésta era toda su aportación, al menos en la época de Kepler. En si misma la tercera ley no introduce cambio alguno en la teoría de los planetas, ni tampoco permite a los astrónomos computar cantidades hasta entonces desconocidas, pues conocían ya de antemano las dimensiones y los períodos de revolución asociados a cada una de las órbitas planetarias.

A pesar de que sólo tuvo escasas aplicaciones prácticas inmediatas, la tercera ley es precisamente del tipo que más fuerte fascinación ejerció sobre

Kepler a lo largo de su carrera. Kepler era un matemático neoplatónico, o neopitagórico, convencido de que la tarea del científico es descubrir las regularidades matemáticas simples que se esconden en todas y cada una de las partes de la naturaleza. Para él, al igual que para otros de su misma opinión, una simple regularidad matemática era en sí misma una explicación. La tercera ley explicaba por sí sola la configuración particular en que Dios había dispuesto las diferentes órbitas planetarias, y este tipo de explicación, deducido de la armonía matemática, es el que continuamente Kepler buscó en los ciclos. Propuso toda una serie de nuevas leyes del mismo tipo, todas ellas abandonadas en épocas posteriores, pues a pesar de su armonía no explicaban con demasiado acierto las observaciones. Con todo, no puede decirse que Kepler fuera demasiado riguroso en la selección. Siempre creyó haber descubierto y demostrado un gran número de regularidades matemáticas, y éstas fueron sus leyes astronómicas favoritas.

En su primera obra importante, el *Mysterium cosmographicum*, Kepler sostenía que el número de los planetas y las dimensiones de sus órbitas podían ser comprendidos en términos de la relación entre las esferas planetarias y los cinco sólidos regulares o "cósmicos". Estos sólidos vienen representados en la figura 42*a* y presentan como característica común, y exclusiva de ellos, la identidad de todas las caras que componen a cada uno de los mismos y el hecho de que todas las figuras usadas para formar las caras sean equiláteras. Ya en la antigüedad se había demostrado que sólo podían existir cinco de tales solidos: el cubo, el tetraedro, el dodecaedro, el icosaedro y el octaedro. Kepler indicaba que si se circunscribía al cubo la esfera de Saturno, se inscribía en aquél la esfera de Júpiter, se ajustaba el tetraedro en el interior de la esfera de Júpiter, se inscribía en el interior del tetraedro la esfera de Marte, y así sucesivamente para los tres sólidos y los tres planetas restantes, las dimensiones relativas de todas las esferas serían precisamente las que Copérnico había determinado con sus mediciones. Tal construcción viene representada en la figura 42*b*. Para poder utilizar el esquema indicado es necesario que sólo existan seis planetas, puestos en correspondencia con los cinco sólidos regulares. En tal caso quedarán perfectamente determinadas las dimensiones relativas permitidas a todas y

cada una de las esferas planetarias. Ésta es la razón, decía Kepler, por la que sólo hay seis planetas y están dispuestos de la forma en que lo están. La naturaleza concebida por Dios es matemática.

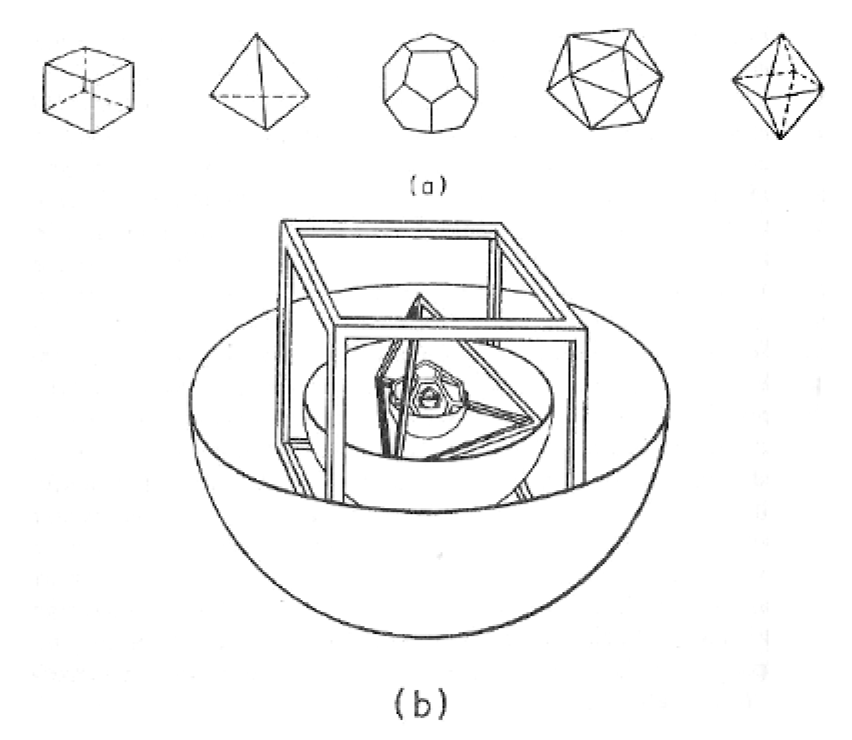


FIGURA 42. — Teoría de Kepler sobre los cinco sólidos regulares. El diagrama (*a*) presenta estos cinco sólidos. Son, de izquierda a derecha, el cubo, el tetraedro, el dodecaedro, el icosaedro y el octaedro. Su ordenación es la que Kepler les aplicó para explicar las dimensiones de las esferas planetarias. El diagrama (*b*) muestra la aplicación kepleriana propiamente dicha. La esfera de Saturno está circunscrita al cubo, mientras que la esfera de Júpiter está inscrita en éste. El tetraedro está inscrito en la esfera de Júpiter, y así sucesivamente para las restantes esferas y sólidos según el orden dado en (*a*).

El empleo por parte de Kepler de los sólidos regulares no era una imple extravagancia juvenil, o en caso de considerarla como tal, debemos admitir que jamás alcanzó la madurez. Una forma modificada de la misma ley aparece veinte años más tarde en sus *Harmonices mundi*, el mismo libro donde proponía la tercera ley. En dicha obra Kepler volvía a elaborar una nueva serie de regularidades neoplatónicas que relacionaban las velocidades orbitales máximas y mínimas de los planetas con los intervalos consonantes de la escala musical. Hoy en día puede parecernos extraña esta intensa fe en las armonías de los números, pero el hecho se debe, al menos en parte, a

que los científicos actuales están dispuestos a descubrir armonías algo más abstrusas. La aplicación por parte de Kepler de su fe en las armonías puedo parecemos ingenua, pero, en sí misma, esta fe no es esencialmente diferente a algunas de las motivaciones que guían la mejor investigación contemporánea. Sin duda alguna, la actitud científica de que hizo gala Kepler en alguna de sus "leyes" que hoy hemos abandonado es la misma que le impulsó a descubrir las tres leyes que seguimos conservando. Tanto las "leyes" como las leyes proceden de una misma y renovada fe en la existencia de la armonía matemática, aspecto que tan gran papel había ya desempeñado al empujar a Copérnico a romper con la tradición astronómica y a persuadirle de que, en realidad, la tierra se movía. No obstante, es en la obra de Kepler, y de forma muy particular en su parte actualmente obsoleta, donde queda ilustrado de una forma más pura y característica el esfuerzo neoplatónico por descubrir las ocultas armonías matemáticas con que el espíritu divino ha impregnado la naturaleza.

GALILEO GALILEI

Kepler resolvió el problema de los planetas. Ciertamente, su versión de la teoría de Copérnico habría acabado por convertir al copernicanismo a todos los astrónomos, especialmente a partir de 1627, año en que Kepler editó las *Tablas rodolfinas*, derivadas de su nueva teoría y manifiestamente superiores a todas las tablas astronómicas hasta entonces en uso. Así pues, la historia de los componentes astronómicos de la revolución copernicana podría darse por terminada con el progresivo reconocimiento de la obra de Kepler, pues se encerraban en ella todos los elementos necesarios para dar permanencia a esta revolución en el campo de la astronomía. Sin embargo, lo cierto es que los componentes astronómicos de la historia no acaban en la obra de Kepler. En 1609 el científico italiano Galileo Galilei (1564-1642) escrutaba por primera vez los cielos a través de un telescopio, aportando a la astronomía los primeros datos cualitativos nuevos desde los recopilados en la antigüedad. El telescopio de Galileo cambiaba las premisas del

enigma que el cielo planteaba al astrónomo facilitando su resolución. El nuevo instrumento permitió, en manos de Galileo, descubrir innumerables testimonios en favor de la teoría de Copérnico. No obstante, antes de que Galileo formulara en nuevos términos el contenido del enigma, éste ya había sido resuelto por otros caminos distintos. Si Galileo hubiera efectuado su labor unos años antes, la historia de la revolución copernicana habría sido muy otra. Al producirse en el momento en que lo hizo, la obra astronómica de Galileo contribuyó esencialmente a una operación de limpieza general cuando la victoria final ya aparecía claramente sobre el horizonte.

En 1609 el telescopio era un instrumento nuevo, sin que pueda asegurarse con precisión hasta qué punto. Galileo tuvo noticias de que algunos pulidores de lentes holandeses habían combinado dos lentillas de tal forma que al observar a su través aumentaban de tamaño los objetos alejados; ensayó por su propia cuenta diversas combinaciones y no tardó en construir un telescopio de escasa potencia. A continuación hizo algo que, aparentemente, nadie había hecho antes que él: dirigió su telescopio hacia el cielo. El resultado fue asombroso. A cada observación se descubrían nuevos e insospechados objetos en el cielo. Incluso cuando se apuntaba el telescopio hacia objetos celestes familiares como el sol, la luna y los planetas, se descubrían nuevas facetas de importancia en tan viejos amigos. Galileo, que ya era copernicano desde hacía algunos años, cuando tuvo conocimiento del telescopio se esforzó por hacer de cada nuevo descubrimiento un argumento en favor de las tesis de Copérnico.

La primera revelación del telescopio fue la existencia de nuevos mundos en el firmamento, hecho por el que Donne se lamentaría sólo dos años más tarde. Galileo descubría nuevas estrellas en todas direcciones. Incrementaba la población de las constelaciones más populosas. Se descubrió ahora que la Vía Láctea, que a simple vista no es más que un pálido resplandor en el cielo (con frecuencia había sido considerada un fenómeno sublunar, análogo a los cometas, o como una reflexión de la luz difusa que proviene del sol y de la luna), era una gigantesca colección de estrellas, demasiado débiles y juntas como para poder ser individualizadas a

simple vista. Durante la noche los cielos se poblaban de innumerables huéspedes nuevos. La vasta extensión del universo, quizá incluso su infinitud, postulada por algunos copernicanos, parecía hacerse menos inverosímil. La mística visión de Bruno de un universo cuya población y extensión infinitas proclamaban la infinita creatividad de la divinidad casi se había convertido en un dato sensible.

La observación de las estrellas también resolvió una dificultad más técnica con la que se habían enfrentado los copernicanos. Quienes habían practicado la observación a simple vista habían hecho estimaciones del diámetro angular de las estrellas y, con ayuda del valor generalmente admitido para la distancia desde la tierra a la esfera estelar, habían transformado aquél en una estimación de sus dimensiones lineales. En un universo ptolemaico, estos cálculos habían proporcionado resultados francamente razonables: las estrellas podían ser casi tan grandes como el sol. No obstante, tal como Brahe recalcó varias veces en sus críticas al copernicanismo, si el universo de Copérnico era tan vasto que exigía la ausencia de paralaje estelar, el tamaño de las estrellas debía ser increíblemente grande. Según los cálculos de Brahe, las estrellas más brillantes del cielo debían poseer unas dimensiones superiores a las de la órbita terrestre, extremo que, no sin ciertas razones naturales para la época, se negaba a admitir. Sin embargo, cuando el telescopio fue dirigido hacia los cielos, se puso de manifiesto que el problema de Brahe sólo era tal en apariencia. En modo alguno era necesario que las estrellas fueran tan grandes como él había estimado en sus cálculos. Si bien el telescopio acrecentó de forma considerable el número de estrellas visibles en el cielo, no incrementó sus dimensiones aparentes. A diferencia del sol, la luna y los planetas, cuerpos todos ellos aumentados de tamaño por el telescopio de Galileo, las estrellas seguían manteniendo sus dimensiones. Se hizo palmario que la observación a simple vista había sobreestimado en extremo el diámetro angular de las estrellas, error que se explica en la actualidad como una consecuencia de la turbulencia atmosférica que enturbia las imágenes de las estrellas, con lo que pasan a ocupar sobre la retina una superficie más grande que la que cubrirían sus imágenes no deformadas. El

mismo fenómeno es el responsable de los centelleos de las estrellas. La turbulencia atmosférica y sus consecuencias quedan parcialmente eliminadas por el telescopio, que reúne un número mucho mayor de rayos luminosos y los hace llegar al ojo.

No obstante, las estrellas no constituyeron la única prueba, ni incluso la mejor, en favor del copernicanismo. Cuando Galileo dirigió su telescopio hacia la luna, descubrió que su superficie estaba cubierta por cavidades y cráteres, valles y montañas. Midiendo la longitud de las sombras proyectadas en los cráteres y la de las sombras de las montañas a una hora en que eran perfectamente conocidas las posiciones relativas del sol, la luna y la tierra, consiguió estimar la profundidad de los declives lunares y la altura de sus protuberancias, iniciando con ello una descripción tridimensional de la topografía lunar. Según Galileo, dicha topografía era bastante similar a la terrestre. Tal como había sucedido con las mediciones del paralaje de los cometas, las observaciones de la luna a través del telescopio suscitaron nuevas dudas acerca de la distinción tradicional entre la región celeste y la región terrestre, dudas que se vieron reforzadas casi de inmediato por las observaciones telescópicas del sol. Éste también mostraba una serie de imperfecciones, entre ellas una serie de manchas sombreadas que aparecían y desaparecían sobre su superficie. La propia existencia de las manchas estaba en contradicción con la supuesta perfección de la región celeste; su aparición y desaparición contradecían la inmutabilidad de los cielos. Peor aún, el movimiento de las manchas sobre el disco solar indicaba que el sol giraba constantemente sobre sí mismo, constituyéndose así en un paradigma visible de la rotación axial de la tierra.

Pero había algo todavía más grave que cuanto acabamos de exponer. Galileo observó Júpiter con el telescopio y descubrió en el cielo cuatro pequeños puntos luminosos muy próximos a dicho planeta. Observaciones múltiples efectuadas en noches sucesivas mostraron que las posiciones relativas de dichos puntos luminosos se modificaban de tal forma que la explicación más simple era suponer que giraban continuamente y de forma muy rápida alrededor de Júpiter (figura 43). Estos cuerpos celestes eran las cuatro lunas principales de Júpiter, y su descubrimiento ejerció un inmenso

impacto en el pensamiento astronómico y extra-astronómico del siglo XVII. Se tuvo la sensación de que existían nuevos mundos, tanto “en los planetas” como “en el firmamento”. Más importante aún, y del todo inconcebible, tanto en la hipótesis ptolemaica como en la copernicana: estos nuevos mundos no se movían en órbitas aproximadamente circulares alrededor del centro del universo, sino que, en apariencia, se desplazaban alrededor de un planeta comportándose de forma similar a como lo hace la luna en la astronomía copernicana. Así pues, el descubrimiento de las lunas de Júpiter debilitaba la fuerza de otra de las objeciones planteadas al sistema de Copérnico. Tanto la vieja como la nueva astronomía debían admitir la existencia de satélites gobernados por los planetas. Además, y quizá sea éste el hecho más determinante, las observaciones de Júpiter ofrecían un modelo visible del sistema solar copernicano. Había en el seno del espacio planetario un cuerpo celeste rodeado de sus propios “planetas”, de forma totalmente equivalente a la de los planetas hasta entonces conocidos que circundaban al sol. El telescopio multiplicó el número de argumentos en favor del copernicanismo casi tan rápidamente como el de los mismos cuerpos celestes.



FIGURA 43. — Tres observaciones sucesivas de Júpiter y sus satélites separadas por intervalos de varios días. La disposición constantemente variable de los cuatro pequeños satélites se explica perfectamente suponiendo que están en continua rotación alrededor del planeta.

Fueron otros muchos los datos en favor del copernicanismo extraídos de las observaciones telescópicas, pero sólo las observaciones de Venus aportan una prueba suficientemente directa de la correcta fundamentación de la propuesta de Copérnico como para que nos ocupemos aquí de ella. El propio Copérnico había indicado en el capítulo décimo del Libro Primero del *De revolutionibus* que, si fuera observable en detalle, el aspecto de Venus podría proporcionarnos información directa sobre la forma de su órbita. En caso de que Venus esté fijado a un epiciclo que se mueve sobre un deferente centrado en la tierra y, tal como se indica en la figura 44*a*, la

tierra, el sol y el centro del epiciclo estén alineados, un observador situado sobre la tierra jamas podría ver otra cosa que una tajada, en fase creciente, del planeta. Por el contrario, si la órbita de Venus circunda al sol, tal como viene indicado en la figura 44*b*, un observador situado sobre la tierra podrá ver un ciclo casi completo de las fases de Venus y análogo al de la luna; solamente no podría contemplar las fases próximas a la “nueva” y “llena”, pues en tales posiciones Venus estaría demasiado cerca del sol. Es imposible distinguir las diferentes fases de Venus a simple vista, pues el ojo sólo percibe los planetas como simples puntos carentes de forma. El telescopio aumenta suficientemente los planetas como para darles forma. Las variaciones de ésta, tal como nos muestra la figura 44*c*, dan una prueba irrefutable de que Venus se desplaza a lo largo de una órbita centrada en el sol.

Las pruebas en favor del copernicanismo que aportó el telescopio de Galileo son de una fuerza extraordinaria, lo que no impide que también sean pruebas extrañas. Ninguna de las observaciones discutidas en líneas anteriores, a excepción quizá de la última de ellas, aporta una prueba directa de los principios esenciales de la teoría copernicana; es decir, la posición central ocupada por el sol o el movimiento de los planetas a su alrededor. Tanto el universo de Ptolomeo como el de Brahe tenían espacio suficiente como para albergar las nuevas estrellas descubiertas; uno y otro podían ser alterados para permitir la existencia de imperfecciones en el cielo así como la de satélites vinculados a los cuerpos celestes; el sistema ticónico daba una explicación tan buena de las fases observadas de Venus, como la ofrecida por el sistema copernicano. En consecuencia, el telescopio no probaba en modo alguno la validez del esquema conceptual de Copérnico. No obstante, fue un arma de extraordinaria eficacia en la batalla desencadenada. No aportaba ninguna prueba, pero era un instrumento de propaganda.

Con anterioridad a 1609 la gran fuerza psicológica del sistema de Ptolomeo residía en su conservadurismo. Sus partidarios no querían verse obligados a someterse a un nuevo aprendizaje. Pero si el sistema ptolemaico precisaba amplias revisiones para ajustarse a los resultados obtenidos

mediante la observación telescópica, acabaría por per der incluso su atractivo conservador. Casi era tan fácil llevar a cabo una transición total a las filas del copernicanismo como adaptarse a la versión que requería el sistema de Ptolomeo. Muchos de quienes se tomaron en serio los datos observacionales optaron por la transición total. Estos nuevos conversos también pueden haberse sentido impulsados por otra consideración marginal: los copernicanos, o al menos sus elementos más radicales, habían previsto el tipo de universo que el telescopio estaba poniendo al descubierto. Habían predicho un detalle, las fases de Venus, con toda precisión. Y lo que era más importante, habían adelantado juicios, al menos vagamente, sobre las imperfecciones de la región celeste y su considerable población. Su visión del universo corría pareja con el universo que ponía al descubierto el telescopio. Pocas frases más fastidiosas o más eficaces que el "ya te lo había dicho".

Para el iniciado en astronomía la prueba del telescopio era tal vez superflua. Las leyes de Kepler y sus *Tablas rodolfinas* habrían sido igualmente eficaces, aunque quizá de forma mucho más lenta. Pero el mayor impacto inmediato producido por el telescopio no fue sobre el iniciado en astronomía. La primera función en que el telescopio se probó único fue la de proporcionar una documentación no matemática y generalmente accesible al punto de vista copernicano. A partir de 1609, las gentes que sólo poseían vagos conocimientos de astronomía podían mirar a través de un telescopio y persuadirse de que el universo no se ajustaba a los ingenuos preceptos del sentido común. Y los hombres miraron, convirtiéndose el telescopio en un popularísimo juguete a lo largo de todo el siglo XVII. Gentes que nunca habían mostrado interés por la astronomía o por ninguna otra ciencia compraron o pidieron prestado el nuevo instrumento para escrutar los cielos con avidez durante las noches despejadas. El observador aficionado se convirtió en un personaje popular, sujeto a un mismo tiempo de parodia y emulación. Con él hizo su aparición un nuevo género literario. Tanto los orígenes de la divulgación científica como de la ciencia-ficción se remontan al siglo XVII, siendo los principales temas de su primera etapa el telescopio y los descubrimientos con él

efectuados. Ahí reside la verdadera importancia de la obra astronómica de Galileo: su popularización de la astronomía. De la astronomía copernicana, se entiende.

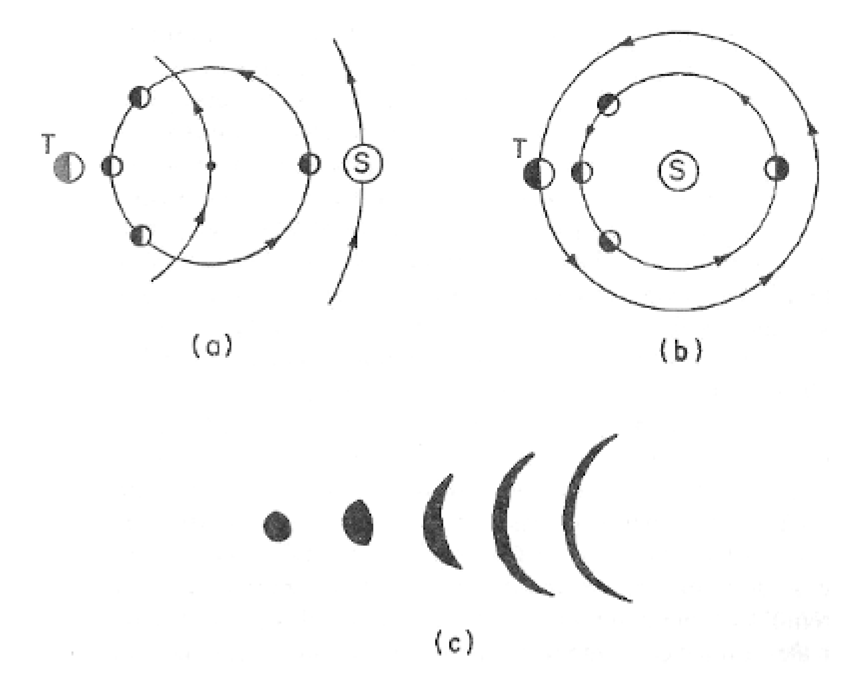


FIGURA 44. — Las fases de Venus en el sistema ptolemaico (*a*), en el sistema copernicano (*b*) y tal como son vistas con ayuda de un telescopio de escasa potencia (*c*). En (*a*) un observador terrestre siempre estaría limitado a ver una delgada media luna de la cara iluminada de Venus. En (*b*) podría ver casi toda la cara iluminada de Venus en los instantes inmediatamente anteriores y posteriores al paso del planeta por detrás del sol. En la parte izquierda de (*c*) se muestra el aspecto casi circular que presenta Venus cuando comienza a hacerse visible como estrella vespertina a partir de observaciones efectuadas con un telescopio de poca potencia. Las restantes observaciones reproducidas en (*c*) nos indican cómo decrece la media luna de Venus al tiempo que aumentan sus dimensiones aparentes cuando el movimiento orbital del planeta lo aproxima a la tierra.

EL DECLIVE DE LA ASTRONOMÍA PTOLEMAICA

Las elipses de Kepler y el telescopio de Galileo no acabaron de inmediato con la oposición al copernicanismo. Por el contrario, tal como ya hemos indicado a comienzos del presente capitulo, la oposición más tenaz y encarnizada no se organizó hasta después de que Kepler y Galileo hubieran llevado a cabo sus principales descubrimientos astronómicos. La obra de Kepler, como había ocurrido sesenta y cinco años antes con la de

Copérnico, sólo era accesible a los astrónomos de sólida preparación y, a pesar de saberse a qué gran precisión había llegado Kepler en sus trabajos, fueron muchos los astrónomos que consideraron sus órbitas no circulares y sus nuevas técnicas para la determinación de las velocidades planetarias demasiado extrañas y antipáticas como para concederles de inmediato su plena aceptación. Hasta alrededor de 1650 un buen número de astrónomos europeos de primera fila centraron sus esfuerzos en demostrar que era posible igualar la precisión alcanzada por Kepler con sistemas matemáticos menos radicales. Uno intentó reincorporar los epiciclos; otro admitió las elipses, aunque sosteniendo que la velocidad de los planetas se mantenía constante con relación al foco de la elipse no ocupado por el sol; unos terceros probaron órbitas con otras formas distintas a la de la elipse. Ninguna de estas investigaciones se vio coronada por el éxito y, hacía finales de siglo, fueron haciéndose cada vez más infrecuentes. No obstante, las leyes de Kepler no se convirtieron en bases universalmente aceptadas por los mejores astrónomos europeos para los cálculos planetarios hasta las últimas décadas del siglo XVII.

Las observaciones de Galileo se enfrentaron en un primer momento con una oposición todavía más encarnizada, aunque de tipo diferente. Con el advenimiento del telescopio, el copernicanismo dejó de ser algo esotérico. Ante todo, ya no era competencia exclusiva del astrónomo versado en técnicas matemáticas, con lo que se convirtió en una teoría más inquietante y, para algunos, aún más peligrosa. Los nuevos mundos descubiertos por el telescopio eran la fuente esencial del malestar de Donne. Algunos años más tarde las observaciones telescópicas proporcionaron una parte del impulso necesario para poner en movimiento la maquinaria eclesiástica de la oposición católica oficial al copernicanismo. Una vez Galileo hizo públicas sus observaciones, hecho que ocurrió en 1610, no fue posible deshacerse del copernicanismo considerándolo una simple teoría matemática, útil pero ni ninguna importancia física. Ni incluso los más optimistas podían seguir considerando la idea de un movimiento terrestre como una locura momentánea llamada a desaparecer por sí misma de modo natural. Por consiguiente, los descubrimientos efectuados con el telescopio se

convirtieron en el foco natural y apropiado de gran parte de la constante oposición a la propuesta de Copérnico, pues colocaban las conclusiones cosmológicas en la picota de una forma mucho más clara y rápida que lo hacían las páginas llenas de fórmulas matemáticas.

Dicha oposición tomó formas muy variadas. Algunos de los más fanáticos oponentes de Galileo se negaron incluso a mirar a través del nuevo instrumento, declarando que si Dios hubiera querido que el hombre usara tal medio para adquirir sus conocimientos, le habría dotado de ojos telescópicos en lugar de otorgarle los que ya posee. Otros miraban de buena gana, incluso con curiosidad, pero proclamaban que los nuevos objetos no eran más que ilusiones ópticas provocadas por el propio telescopio, en modo alguno objetos situados en los cielos. La actitud de la mayoría de los oponentes de Galileo era más racional. Admitían, como Bellarmino, que los fenómenos y objetos observados estaban en el cielo, aunque negaban que constituyesen una prueba en favor de las afirmaciones de Galileo. En esto tenían toda la razón: el telescopio aportaba buenos argumentos, pero no probaba nada.

La continua oposición a los resultados de las observaciones telescópicas era sintomática de la profunda y tenaz oposición al copernicanismo durante el siglo XVII. Ambos aspectos tienen un mismo origen, una reticencia subconsciente a consentir la destrucción de una cosmología que, durante siglos, había constituido la base de la vida cotidiana, tanto práctica como espiritual. La reorientación conceptual que, después de Kepler y Galileo, era sinónimo de economía para los científicos, se presentaba frecuentemente como una pérdida de coherencia conceptual para hombres del tipo de Donne y Milton, cuyas preocupaciones se situaban básicamente en otros campos, y personas cuyos intereses primordiales eran de tipo religioso, moral o estético continuaron oponiéndose con acritud al copernicanismo durante muchísimo tiempo. Los ataques a las tesis de Copérnico apenas habían disminuido a mediados del siglo XVII. Durante las primeras décadas del siglo XVIII continuaron apareciendo varios opúsculos importantes en los que se insistía acerca de una interpretación literal de las Escrituras y sobre lo absurdo de una tierra en movimiento. En época tan

tardía como en 1873, el ex presidente de un seminario americano para la formación de profesores luteranos publicó una obra en la que condenaba a Copérnico, Newton y otros varios eminentes astrónomos por su divergencia con la cosmología de las Escrituras. Todavía hoy, de vez en cuando, los periódicos recogen las declaraciones de algún viejo chocho que insiste en la unicidad e inmovilidad de la tierra. ¡Los viejos esquemas conceptuales no mueren jamás!

Pero lo que sí hacen los viejos esquemas es marchitarse, y la desaparición progresiva del concepto de unicidad e inmovilidad de la tierra se remonta de forma clara, aunque casi imperceptible, a los trabajos de Kepler y Galileo. Durante el siglo y medio inmediatamente posterior a la muerte de Galileo, acaecida en 1642, la creencia en un universo geocéntrico se fue transformando poco a poco de un signo de cordura en un signo de inflexible conservadurismo, para pasar a serlo después de intolerancia excesiva, y acabando por convertirse en un índice de fanatismo radical. A mediados del siglo XVII es difícil encontrar un gran astrónomo que no sea copernicano; a finales del mismo siglo es imposible. La astronomía elemental reaccionó más lentamente. Con todo, durante las últimas décadas del siglo se enseñaban simultáneamente los sistemas de Copérnico, Ptolomeo y Brahe en muchas universidades protestantes de primera fila. Durante el siglo XVIII fueron gradualmente abandonados los cursos sobre los dos últimos sistemas citados. Por lo que respecta a la cosmología popular, fue el campo que recibió con mayor lentitud el impacto del copernicanismo. Hubo que dejar transcurrir la mayor parte del siglo XVIII para dotar al pueblo y a sus maestros de un nuevo sentido común y para convertir el universo copernicano en una propiedad colectiva del hombre occidental. El triunfo del copernicanismo fue un proceso gradual y su velocidad de progresión varió ampliamente según el estatuto social, la afiliación profesional y las creencias religiosas. Pero, a pesar de todas las dificultades y extravagancias, fue un proceso inevitable, al menos tanto como pueda haberlo sido cualquier otro proceso conocido dentro de la historia de las ideas.

El universo copernicano asimilado durante el siglo y medio que siguió a la muerte de Galileo no era, sin embargo, el universo de Copérnico, ni incluso el de Galileo o el de Kepler. Su nueva estructura no derivaba predominantemente de las pruebas astronómicas. Copérnico y los astrónomos que le sucedieron llevaron a cabo la primera ruptura importante y con éxito frente a la cosmología aristotélica, y fueron ellos quienes comenzaron la construcción del nuevo universo. Sin embargo, los primeros copernicanos no vieron con claridad adonde conducía su trabajo. Durante el siglo XVII, otras muchas corrientes científicas y cosmológicas convergieron con la copernicana para modificar y completar el marco de referencia cosmológico que había guiado su pensamiento. El copernicanismo que heredaron los siglos XVIII, XIX y XX es un copernicanismo revisado para que pudiera adaptarse a la concepción newtoniana del mundo. El tema que abordaremos en nuestro último capítulo será la integración histórica definitiva de la astronomía copernicana en el marco del completo y coherente universo imaginado en el siglo XVII, pero lo haremos sólo a grandes rasgos y con la limitada perspectiva propia de un epílogo. En la medida en que la revolución copernicana fue meramente una revolución en el pensamiento astronómico, su historia finaliza con las presentes líneas. Las páginas que siguen intentan esbozar una revolución más amplia, la que cubre también los campos de la cosmología y la ciencia en general, revolución que se inició con Copérnico y a través de la que fue por fin completada la revolución copernicana.

Capítulo 7

EL NUEVO UNIVERSO

La nueva perspectiva científica

Kepler y Galileo acumularon pruebas impresionantes sobre el nuevo estatuto de la tierra como planeta en movimiento. El concepto de órbita elíptica y los nuevos datos reunidos gracias al telescopio sólo eran pruebas *astronómicas* en favor de una tierra planetaria. En modo alguno respondían a las objeciones *extra-astronómicas* que se les planteaban. Mientras quedaban sin respuesta, cada uno de estos argumentos, físicos, cosmológicos o religiosos, daban testimonio de la inmensa diferencia existente entre los conceptos de la astronomía técnica y los empleados en otras ciencias y en filosofía. A medida que se iba haciendo más difícil dudar de la innovación introducida en astronomía, más urgente se hizo la necesidad de efectuar ciertos ajustes en otros dominios del pensamiento. La revolución astronómica se mantuvo incompleta hasta que no se llevaron a cabo los ajustes indicados.

La mayor parte de las grandes conmociones en el pensamiento científico producen disparidades conceptuales del tipo indicado. Por ejemplo, en la actualidad estamos viviendo las últimas etapas de una revolución científica iniciada por Planck, Einstein y Bohr. Los nuevos conceptos que ellos y otros han introducido, y sobre los que reposa la revolución científica contemporánea, muestran estrechos paralelismos históricos con el concepto copernicano de una tierra planetaria. El átomo de Bohr o el espacio finito, pero ilimitado, de Einstein fueron introducidos

para resolver acuciantes problemas planteados en el seno de una especialidad científica concreta. Quienes los aceptaron, lo hicieron, en un primer momento, en razón de la inmensa necesidad sentida en sus dominios de investigación y aún a costa de su evidente oposición al sentido común, a la intuición física y a los conceptos fundamentales de otros campos científicos. Durante cierto tiempo, los especialistas utilizaron nuevas ideas como las indicadas a pesar de que parecieran increíbles dentro de un contexto científico más amplio.

No obstante, el empleo continuo de incluso el más extraño de los conceptos lo hace aceptable y, una vez convertido en aceptable, adquiere una función científica más amplia. Para utilizar el vocabulario del capítulo 1, deja de ser un simple instrumento paradójico y *ad hoc* para describir de forma más económica lo ya conocido, y se convierte en un instrumento básico para explicar y explorar la naturaleza. Una vez alcanzado este estadio, es imposible restringir el nuevo concepto al dominio de una única especialidad científica. La naturaleza no puede revelar propiedades incompatibles en campos diferentes. Si el electrón del físico puede saltar de una órbita a otra sin atravesar el espacio que las separa, el electrón del químico debe hacer otro tanto, mientras que los conceptos de materia y espacio del filósofo exigen una revisión. Toda innovación fundamental dentro de una especialidad científica transforma inevitablemente las ciencias colindantes y, de forma algo más lenta, los mundos del filósofo y del hombre cultivado.

La innovación introducida por Copérnico no es una excepción. En las primeras décadas del siglo XVII era a lo sumo una innovación astronómica. Fuera de los límites de las astronomía planteaba una multitud de embarazosos problemas mucho más evidentes que las cuestiones de detalle numérico que había resuelto. ¿Por qué los cuerpos pesados siempre caen sobre la superficie de la tierra si ésta se mueve alrededor del sol? ¿A qué distancia están situadas las estrellas y cuál es su función en la estructura del universo? ¿Qué mueve a los planetas? ¿De qué modo, si no existen esferas, se mantienen en sus órbitas? La astronomía copernicana aniquilaba las respuestas tradicionales a tales cuestiones, pero no ofrecía nada nuevo para

sustituirlas. Eran necesarias una nueva física y una nueva cosmología antes de que la astronomía pudiera participar nuevamente de forma plausible en la confección de un marco de pensamiento unificado.

Esta nueva ciencia y esta nueva cosmología fueron creadas antes de finalizar el siglo XVII, y todos sus progenitores pertenecían a la minoría copernicana. Su adhesión al copernicanismo dio un nuevo enfoque y dirección a gran parte de sus investigaciones, dando nacimiento a un nuevo conjunto de problemas, uno de los cuales —¿cuál es la causa del movimiento terrestre?— ya ha aparecido de forma breve en nuestro estudio del *anima motrix* de Kepler. Por otro lado, el copernicanismo aportaba una multitud de indicaciones sobre los conceptos y técnicas que exigían la solución de estos nuevos problemas. Por ejemplo, al sugerir la unificación de las leyes terrestres y celestes, hacía del proyectil una legítima fuente de información sobre el problema de los movimientos planetarios. Finalmente, el copernicanismo dio un nuevo significado y un nuevo valor a determinadas doctrinas cosmológicas que, si bien fueron corrientemente admitidas por una minoría durante la antigüedad y la Edad Media, habían sido desdeñadas hasta aquel preciso momento por la mayor parte de los científicos. Durante el siglo XVII varias de tales teorías nuevamente popularizadas, en particular el atomismo, se convirtieron en una fuente constante de significativas sugerencias para la ciencia.

Estos nuevos problemas, nuevas técnicas y nuevas evaluaciones constituyen la nueva perspectiva que la ciencia del siglo XVII heredo del copernicanismo. El capítulo precedente ha mostrado los efectos de este renovado punto de vista sobre la astronomía. En las páginas que siguen expondremos su papel en el desarrollo de otros campos de la ciencia y de la cosmología, pues el universo newtoniano nació en un clima intelectual que el copernicanismo había ayudado a fertilizar. No obstante, a diferencia de las leyes de Kepler, que en el campo de la astronomía constituyen la culminación de la revolución copernicana, el universo newtoniano es un producto de algo más que la innovación introducida por Copérnico. Para estudiar su evolución y descubrir en qué modo el concepto de una tierra planetaria tomó por fin un sentido coherente, deberemos introducir a

menudo conceptos y técnicas hasta aquí menospreciadas a causa de su escasa relación con el desarrollo de la astronomía o la cosmología anteriores a la muerte de Copérnico. Así pues, el problema que nos proponemos examinar ahora va más allá de los límites de la revolución copernicana propiamente dicha.

HACIA UN UNIVERSO INFINITO

El universo aristotélico había sido, en la mayor parte de sus versiones, un universo finito —materia y espacio finalizaban conjuntamente en la esfera de las estrellas—, y la mayor parte de los primeros copernicanos mantuvieron este rasgo tradicional del universo. En las cosmologías de Copérnico, Kepler y Galileo, el centro del sol coincidía con el centro de la esfera estelar finita; el sol se limitaba a intercambiar su posición con la tierra, convirtiéndose así en el único cuerpo central, símbolo neoplatónico de la divinidad. Este nuevo universo de las dos esferas era una revisión natural de la cosmología tradicional. Al no existir pruebas concretas en sentido contrario, muy bien habría podido subsistir hasta el siglo XIX, es decir, hasta el momento en que los ya muy perfeccionados telescopios mostraron que no todas las estrellas se encuentran a la misma distancia del sol.

No obstante, la función del modelo de las dos esferas era muy diferente en las concepciones aristotélica y copernicana del mundo; en particular, la finitud ejercía en la primera de ellas funciones esenciales que se encontraban totalmente ausentes en la segunda. Por ejemplo, en la ciencia aristotélica se necesitaba la esfera estelar para arrastrar las estrellas en sus trayectorias diurnas y para proporcionar el impulso que mantenía en movimiento a planetas y objetos terrestres. Además, la esfera exterior definía un centro absoluto del espacio, el centro hacia el que se dirigían por propia voluntad todos los cuerpos pesados. El universo copernicano liberaba a la esfera estelar de todas estas funciones y de muchas otras. El movimiento terrestre no exigía la existencia de un centro absoluto del

espacio; las piedras caían sobre esta tierra en movimiento. Tampoco era necesaria una esfera exterior que generase los movimientos celestes; situadas o no sobre una esfera, las estrellas permanecían inmóviles. Los copernicanos eran libres de conservar la esfera estelar, aunque sólo la tradición podía aducir razones para obrar así, ya que aquélla podía ser abandonada sin desbaratar ni la física ni la cosmología copernicanas. De este modo el copernicanismo dio una nueva libertad al pensamiento cosmológico, cuyo resultado fue una nueva concepción especulativa del universo que sin duda habría horrorizado a Copérnico y a Kepler. Un siglo después de la muerte de Copérnico, el marco de referencia proporcionado por el universo de las dos esferas había sido reemplazado por otro cosmos en el que las estrellas se hallaban diseminadas en un espacio infinito. Cada una de ellas era un “sol”, y se pensaba que eran muchas las estrellas que poseían su propio sistema planetario. Hacia 1700, la tierra, reducida por Copérnico a ser uno de los seis planetas, apenas era ya algo más que un grano de polvo cósmico.

Aunque por ahora los historiadores aún sepan muy poca cosa sobre la forma en que se estableció esta nueva concepción copernicana, su origen está completamente claro. Al suprimir las funciones cosmológicas de la esfera exterior, Copérnico revitalizó tres de las más antiguas teorías especulativas sobre el universo, respectivamente asociadas a la escolástica, al neoplatonismo y al atomismo. Con anterioridad al *De revolutionibus* estas tres cosmologías divergían por completo, tanto por su estructura como por sus motivaciones, y ninguna de ellas tenía un carácter relevante dentro de la ciencia dedicada al estudio de los cielos. No obstante, el copernicanismo hizo que se transformaran en cosmologías científicas y, una vez transformadas, dejaron al descubierto una serie de notables similitudes estructurales.

Consideremos inicialmente el concepto precopernicano de un universo infinito desarrollado por los filósofos islámicos que no podían aceptar la demostración de Aristóteles acerca de la imposibilidad lógica de la existencia del vacío. Este universo era en esencia idéntico al aristotélico. La tierra ocupaba el centro de la esfera estelar en rotación, pero, en este caso,

el espacio no desaparecía junto con la materia al llegar a los límites de la esfera exterior. Por el contrario, la totalidad del universo aristotélico se hallaba sumergida en el seno de un espacio infinito desprovisto de materia, morada de Dios y de los ángeles y a modo de núcleo central. Este concepto del universo, al no poner trabas al poder divino para la creación de un universo infinito, alcanzó cierta popularidad en Europa a partir del siglo XIII, hallándose expuesta en diversos manuales de carácter elemental muy difundidos en la época de Copérnico. Quizá su conocimiento de esta teoría le sirviera de ayuda para justificar la necesaria expansión de la esfera de las estrellas a fin de explicar la ausencia de paralaje observado. Sin embargo, con anterioridad a Copérnico, esta versión de un universo infinito había ejercido escasa influencia, tanto en lo que hace referencia a la práctica astronómica como a la de otros campos científicos. Mientras se mantuvo la creencia en el movimiento ininterrumpido de los cuerpos celestes, se hacía muy difícil suponerles ubicados en el espacio infinito más allá de la esfera exterior. Las funciones de este espacio eran teológicas, no físicas o astronómicas.

Sin embargo, al inmovilizar las estrellas, Copérnico hacía posible la atribución de funciones astronómicas al espacio infinito. Esta nueva libertad fue explotada por primera vez unas tres décadas después de la publicación del *De revolutionibus*. En 1576 el copernicano inglés Thomas Digges introdujo la idea de un universo infinito en una, por otra parte, estricta paráfrasis del Libro Primero de Copérnico, y el resultado, reproducción del original de Digges, es el que se muestra en la figura 45. El núcleo central del universo es idéntico al del *De revolutionibus*, pero las estrellas han sido arrancadas de la superficie de la esfera estelar estacionaria y esparcidas más allá de ella en el espacio infinito aceptado por la antigua y minoritaria tradición cosmológica indicada. Aunque fueran pocos los sucesores inmediatos de Copérnico que llegaron tan lejos como Digges en sus extrapolaciones, la mayor parte de ellos reconoció que ya no había razón alguna para que las estrellas estuvieran situadas sobre una esfera y que las distancias entre éstas y el sol podían variar sin afectar para nada a las apariencias. Cuando el telescopio de Galileo reveló la existencia de

innumerables nuevas estrellas, la dispersión de éstas a lo largo y ancho de un espacio infinito fue tomada casi como un hecho experimental por parte de los astrónomos menos tradicionalistas.

Digges fue el primero en descubrir un universo copernicano infinito, pero esta infinitud la obtuvo mediante la introducción inconsciente de una paradoja que, tanto durante la antigüedad como en la Edad Media, había proporcionado uno de los argumentos de mayor peso para rechazarlo. El sol central y único de Digges es una contradicción, pues en un espacio infinito está tan "al centro" como puede estarlo cualquiera de los planetas o estrellas. El centro es el punto equidistante de todos los de la periferia, y en un espacio infinito esta condición la satisfacen todos sus puntos o ninguno de ellos. El neoplatónico Nicolás de Cusa había estudiado cuidadosamente esta paradoja un siglo antes de Copérnico. Nicolás de Cusa había abrazado la creencia de que el universo es una esfera infinita —una esfera que no lo fuera, decía, sería incompatible con la omnipotencia creadora de Dios—, y había expresado la paradoja resultante afirmando que el centro de la esfera coincidía en todas partes con su periferia. Todo cuerpo situado en este universo, estuviera fijo o en movimiento, se hallaba simultáneamente en su superficie y en su interior. Ninguna parte del espacio podía ser distinguida de otra; todos los cuerpos que están en dicho espacio —la tierra, los planetas y las estrellas— deben moverse y ser de la misma naturaleza.



FIGURA 45. — El universo copernicano de Thomas Digges. Reproducción de la portada de su *Perfit description of the caelestiall orbes*, publicada en 1576. Este diagrama es similar a otras primitivas representaciones del universo copernicano con la única excepción de que aquí las estrellas ya no se ven confinadas a permanecer sobre la superficie de la esfera estelar. No existen estrellas en su interior (si las hubiera, se observaría paralaje estelar), aunque el espacio infinito que se extiende más allá de la esfera estelar esté tachonado de ellas. No obstante, se observará que el sol sigue manteniendo una posición de privilegio y que la distancia entre estrellas es mucho menor que la que hay entre el sol y la esfera celeste. En el universo de Digges, el sol no es una estrella como las demás.

La visión de de Cusa nos proporciona un segundo ejemplo de cosmología que podía verse transformada por las tesis copernicanas. Esta cosmología, tal como fue expuesta por su autor cien años antes de la publicación del *Del revolutionibus*, no tenía sentido alguno desde el punto de vista científico. Como cosmólogo Nicolás de Cusa era un místico que rechazaba alegremente las apariencias en favor de una aprehensión trascendente de la divinidad infinita en la que todas las paradojas se reconciliaban. No obstante, la insistencia neoplatónica en el infinito y sus

paradojas no era intrínsecamente incompatible con las apariencias o con la ciencia. Después de la muerte de Copérnico la tesis neoplatónica indicada proporcionó un motivo y un tema central a los escritos cosmológicos del místico italiano Giordano Bruno, cuya visión del mundo reconciliaba el infinito y las apariencias a través del copernicanismo. El enfoque cosmológico de Bruno estaba tan escasamente influenciado por la ciencia o por las apariencias como el del de Cusa, quien ejerció sobre él gran influencia. Pero sean cuales fueren los motivos de Bruno, lo cierto es que tenía razón. No es necesario que el sol esté en el centro; de hecho, tampoco es necesaria la propia existencia de un centro. Un sistema solar copernicano puede estar situado en cualquier lugar de un universo infinito, con la única condición de que el sol esté lo suficientemente alejado de las estrellas más próximas como para poder explicar la ausencia de paralaje. En tales condiciones, quedan salvadas las apariencias.

La reconciliación por parte de Bruno de un universo infinito y desprovisto de centro con las apariencias constituye sólo un fragmento de su construcción cosmológica. Sus trabajos sobre el tema se iniciaron alrededor de 1584. Bruno hizo también explícita la relación física del sistema solar copernicano con los otros sistemas celestes ubicados en el seno de su espacio infinito. El sol era, según Bruno, una de las infinitas estrellas que se esparcían a lo largo y ancho del espacio infinito; entre los cuerpos celestes que moran en el espacio infinito deben existir planetas habitados, como la tierra. Con tal punto de vista, no sólo la tierra, sino también el sol y el sistema solar en su conjunto, se convertían en insignificantes partículas perdidas en la infinitud de la creación divina; el cosmos compacto y ordenado de los escolásticos era ahora un vasto caos; la ruptura de los copernicanos con la tradición era total.

A pesar de su radicalidad, esta última extensión del copernicanismo se llevó a cabo sin aportar casi nada de nuevo. Dos mil años antes del nacimiento de Bruno, Leucipo y Demócrito, los atomistas de la antigüedad, habían imaginado un universo infinito conteniendo un gran número de soles y de tierras en movimiento. En su época tales doctrinas jamás habían rivalizado con la de Aristóteles en tanto que bases sobre las que edificar un

pensamiento científico global, y sus escritos habían desaparecido casi por completo durante la Edad Media. No obstante, las obras de sus sucesores, Epicuro y Lucrecio, se encuentran entre los principales redescubrimientos literarios de los humanistas del Renacimiento. Bruno extrajo de tales obras, en particular del *De rerum natura* de Lucrecio, muchas de sus más fecundas ideas. El copernicanismo revitalizaba a través de la cosmología de Bruno una tercera concepción especulativa del universo dándole nuevos visos de realidad.

La afinidad entre atomismo y copernicanismo es algo sorprendente, pues ambas líneas de pensamiento parecen ser totalmente ajenas desde el punto de vista histórico y lógico. Los atomistas de la antigüedad habían extraído los principios fundamentales de su cosmología no de la observación, sino básicamente a través de un esfuerzo para resolver paradojas lógicas aparentes. La existencia y el movimiento de cuerpos finitos, pensaban, sólo podía explicarse si el mundo real estaba constituido por diminutos corpúsculos indivisibles, o átomos, que nadaban libremente en el seno de un vasto espacio vacío. El vacío se consideraba necesario para explicar el movimiento. Si no había espacios vacíos, no existía lugar en que pudiera moverse la materia. Asimismo, la indivisibilidad de las partículas últimas era considerada esencial para explicar la existencia de cuerpos finitos; si la materia era infinitamente divisible, sus partes últimas serían simples puntos geométricos que no ocuparían espacio alguno. En consecuencia, parecía imposible que con partes que al tomarlas individualmente no ocupaban ningún volumen pudiera construirse un cuerpo finito que sí lo ocupa. Cero más cero es cero, sea cual sea el número de veces que se repita esta suma. Así pues, decían los atomistas, la realidad debe consistir en átomos indivisibles y vacíos; esta premisa, absolutamente ajena al copernicanismo, era el fundamento de su concepción del mundo.

Sin embargo, esta premisa tuvo algunas consecuencias sorprendentes que no estaban tan alejadas de las tesis copernicanas. El vacío de los atomistas debía ser infinito en extensión, pues sólo podía venir limitado por la materia, y ésta, a su vez, lo sería por el vacío. Cuando materia y espacio, al contrario de lo que sucede en la física aristotélica, dejan de ir a la par es

imposible poner un límite a la extensión del universo. Una vez más, vemos cómo también en el universo de los atomistas desaparecían lugares o cuerpos privilegiados. El propio vacío era neutro; nada permitía distinguir un lugar de otro. La tierra o el sol existían en una determinada región y no en otra simplemente porque los movimientos y las colisiones fortuitos de los átomos habían producido por azar un agregado en dicha región y porque, al encontrarse fortuitamente, se habían enredado y fijado unos con otros. Este proceso muy bien habría podido producirse en cualquier otro lugar, y de hecho, ya que el universo era infinito y contenía una infinidad de átomos, podía afirmarse casi con plena seguridad que otros similares habían tenido lugar en uno u otro momento del tiempo. La cosmología de los atomistas poblaba el infinito vacío de numerosas tierras y soles. No existía dicotomía posible entre lo terrestre y lo celeste. Según los atomistas, la materia, de idéntica naturaleza en todas partes, estaba sometida al mismo conjunto de leyes en todos y cada uno de los puntos del vacío infinito y neutro.

Puesto que el copernicanismo también destruía la unicidad de la tierra, suprimía la distinción terrestre-celeste y sugería la infinitud del universo, el vacío infinito de los atomistas era un receptáculo natural para el sistema solar de Copérnico, o mejor aún, para los numerosos sistemas solares existentes. El mayor mérito de Bruno fue reconocer y estudiar este oscuro parentesco entre las doctrinas antiguas y modernas. Una vez reconocida dicha vinculación, el atomismo dio pruebas de ser la más eficaz y la de mayor trascendencia de las diferentes corrientes intelectuales que, durante el siglo XVII, transformaron en infinito el cosmos finito de Copérnico y postularon la existencia de una pluralidad de mundos habitados en el seno del universo. Con todo, esta extensión de las dimensiones cosmológicas sólo era la primera de las varias funciones importantes que desempeñó el atomismo en la construcción del nuevo universo.

El universo corpuscular

Desde comienzos del siglo XVII el atomismo experimentó un intensísimo resurgimiento. El atomismo se mezcló con el copernicanismo convirtiéndose en uno de los principios fundamentales de la "nueva filosofía" que guiaba la imaginación científica, en parte por su profunda concordancia con las tesis de Copérnico y, en parte, porque representaba la única cosmología disponible capaz de reemplazar la cada vez más desacreditada concepción escolástica del mundo. Las lamentaciones de Donne porque "la nueva filosofía desmenuzaba de nuevo el universo en sus átomos" constituyen uno de los primeros síntomas de la confluencia entre estas corrientes intelectuales hasta entonces independientes. Hacia 1630, la mayor parte de los más prominentes físicos da un ejemplo vivo de los efectos de tal fusión. Constituían aquéllos sus elaboraciones teóricas partiendo de su creencia en el movimiento terrestre y abordaban los problemas planteados por esta tesis copernicana con un conjunto de premisas "corpusculares" extraídas del atomismo antiguo. El "corpuscularismo" que transformó la ciencia del siglo XVII violaba muy a menudo las premisas del atomismo antiguo, pero sin dejar por ello de adscribirse con toda nitidez a dicha línea de pensamiento. Algunos de los "nuevos filósofos" creían que, en principio, las partículas últimas eran divisibles, pero todos estaban de acuerdo en que, de hecho, no se dividían jamás o sólo en raras excepciones. Ciertos físicos dudaban de la existencia del vacío, pero el fluido etéreo con que llenaban la totalidad del espacio era en la inmensa mayoría de los casos tan neutro e inactivo como el propio vacío. Por otro lado, y éste es un hecho de singular importancia, todos admitían que los movimientos, interacciones y combinaciones de las diversas partículas estaban sometidos a una serie de leyes impuestas por Dios a los corpúsculos desde el instante mismo de la creación. Para los partidarios de la teoría corpuscular, el descubrimiento de estas leyes era el primer problema dentro del programa de la nueva ciencia. La segunda dificultad se centraba en aplicar tales leyes a la explicación del rico flujo de experiencias sensoriales.

René Descartes (1596-1650), el gran filósofo francés, fue el primero en aplicar sistemáticamente este programa a los problemas planteados por un

universo copernicano. Comenzó por preguntarse cuál sería el movimiento de un corpúsculo aislado en el vacío, para plantearse a continuación si este movimiento libre del corpúsculo podía haberse alterado a causa de una colisión con una segunda partícula. Descartes creía que todo cambio en el universo corpuscular provenía de una sucesión de movimientos libres interrumpidos a intervalos por colisiones entre corpúsculos. En consecuencia, esperaba deducir la estructura global del universo copernicano dando respuesta a algunas cuestiones como las anteriores. A pesar del carácter intuitivo de todas sus deducciones y de que la mayor parte de las mismas fuesen erróneas, la cosmología que la imaginación dictaba a su razón se reveló en extremo plausible. La división de Descartes dominó gran parte de la ciencia durante casi todo el siglo que siguió a la publicación de sus *Principes de philosophie*, aparecidos en 1644.

La respuesta dada por Descartes a su primer problema fue en extremo feliz. Aplicando a un corpúsculo situado en el espacio infinito y neutro de la cosmología atomista las versiones contemporáneas de la teoría del *impetus* medieval, llegó a un primer enunciado preciso de la ley del movimiento inercial: un corpúsculo en reposo dentro del vacío sigue en dicho estado eternamente, mientras que un corpúsculo en movimiento sigue moviéndose con idéntica velocidad y en línea recta a menos de que sea desviado por otro corpúsculo. La velocidad constante de la partícula era una consecuencia directa de la teoría del *impetus*, en particular de la elaboración efectuada por Galileo de dicha teoría. Pero la linealidad del movimiento constituía una novedad de considerables consecuencias, tipificando las fecundas ideas que el atomismo legó a la ciencia del siglo XVII. El vacío infinito de los atomistas era un espacio sin centro y (salvo en algunas de sus versiones alteradas, por otra parte dejadas de lado a principios de siglo) sin direcciones intrínsecas. En el seno de tal espacio, un cuerpo no sometido a ninguna influencia exterior sólo podía mantenerse en reposo o moverse en línea recta. Los movimientos circulares automantenidos que Copérnico, Galileo y ciertos copernicanos primitivos pidieron prestados a la teoría escolástica del *impetus* eran imposibles. Con posterioridad a Descartes,

estos movimientos circulares dejaron de desempeñar toda función significante en la construcción del universo copernicano.

Descartes reconoció que en la naturaleza todas las partículas o agregados de partículas cambian constantemente su velocidad y dirección. Estas alteraciones, dice Descartes, deben tener su origen en los impulsos o tensiones ejercidas sobre ellas por otros cuerpos (figura 46). Así pues, las colisiones corpusculares se convirtieron en el segundo tema de investigación, aunque con él Descartes tuvo menos éxito. Sólo una de sus siete leyes sobre las colisiones fue mantenida por sus sucesores. Pero, si sus leyes se dejaron de lado, no sucedió lo mismo con su idea del proceso de colisión. Una vez más el corpuscularismo había creado un nuevo problema cuya resolución llegaría unos treinta años después de la muerte de Descartes. Como secuelas de la resolución de este problema emergieron la ley de la conservación de la cantidad de movimiento y, de forma más indirecta, la relación conceptual entre una fuerza y la variación de cantidad de movimiento que produce. Tanto una como otra constituyeron pasos esenciales hacia la consecución del universo newtoniano.

Al pasar de sus leyes del movimiento y de las colisiones a la estructura del universo copernicano, Descartes introdujo un concepto que ha enmascarado de forma muy notable las bases corpusculares de su ciencia y su cosmología. El universo cartesiano está lleno, y la materia que lo ocupa tiene una estructura particular en cada punto del espacio. No obstante, Descartes hizo un continuado uso imaginativo del vacío en la determinación del comportamiento de su particular *plenum*. En primer lugar, se sirvió del vacío para determinar las leyes que rigen el movimiento de las partículas individuales y sus colisiones. A continuación, para descubrir cómo operan estas leyes en un *plenum*, parece haber empezado por imaginar que las partículas nadan en un vacío donde sus movimientos inerciales se ven eventualmente perturbados por colisiones, después de lo cual elimina gradualmente el vacío del sistema al acercar cada vez más entre sí unas partículas con otras, hasta que, finalmente, las colisiones entre corpúsculos y sus movimientos inerciales se mezclan en un mismo proceso dentro del *plenum*. Por desgracia, en un *plenum* los movimientos de todas las

partículas deben ser considerados simultáneamente, lo que crea un problema de increíble complejidad que Descartes apenas intentó resolver. En su lugar, saltó con gran imaginación de sus leyes sobre los corpúsculos hasta la solución final sin pararse en ninguna de las absolutamente esenciales etapas intermedias.

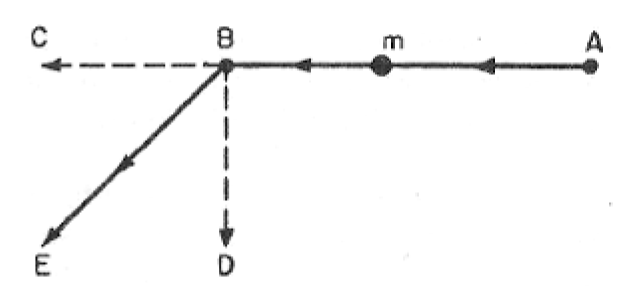


FIGURA 46. — Efecto de un impulso sobre un movimiento inercial. En el punto *A*, el cuerpo *m* recibe un violento impulso que lo lanza hacia *B*. Si no actúa ninguna fuerza adicional el cuerpo se trasladará de *A* a *B* a lo largo de una línea recta y con una velocidad constante. Si cuando llega a *B* recibe un segundo impulso en la misma dirección, continuará su movimiento en linea recta hacia *C*, pero aumentará su velocidad de traslación. Si se le aplica una fuerza en sentido opuesto, puede continuar su camino hacia *C* con menor velocidad que la que poseía al llegar a *B* o bien, en el caso de que la nueva fuerza aplicada sea suficientemente grande, podrá retroceder hacia *A*. Finalmente, si cuando llega a *B* el cuerpo recibe un impulso lateral hacia *D*, iniciará un nuevo movimiento inercial a lo largo de la línea oblicua *BE*. Puede considerarse que el movimiento inercial a lo largo de *BE* es la resultante de dos movimientos inerciales simultáneos, uno según la dirección *BC*, producido por la primera fuerza aplicada en *A*, y otro según la dirección *BD*, producido por el segundo impulso lateral recibido al llegar a *B*.

A Descartes le pareció completamente evidente que los únicos movimientos durables en un *plenum* debían producirse según corrientes circulares. Cada una de las partículas de una corriente de este tipo empujaría a su vecina más próxima hasta que, para evitar el vacío, el impulso revirtiera sobre la primera partícula según una trayectoria aproximadamente circular. Con ello, una vez llenado el vacío potencial, el proceso volvía a iniciarse. Para Descartes, estas corrientes circulares eran los únicos movimientos posibles que perduran. En consecuencia, creía que fuera cual fuese el impulso que Dios dio a los corpúsculos en el momento de la creación, éstos acabarían por moverse según un conjunto de vórtices diseminados por todo el espacio. La figura 47, ilustración de una de las primeras obras de Descartes, reproduce un pequeño grupo de tales vórtices.

Cada vórtice de Descartes era, al menos en potencia, un sistema solar engendrado y regido por las leyes corpusculares de la inercia y de las colisiones. Por ejemplo, los choques corpusculares equilibraban exactamente la tendencia centrífuga que la inercia asigna a cada uno de los corpúsculos del vórtice. Si en un vórtice se eliminaran todas las partículas menos una, ésta se movería en línea recta a lo largo de una tangente al trayecto circular que recorría, con lo que acabaría por abandonar el vórtice. Si no lo hace así es sólo porque sus constantes colisiones con las partículas del vórtice que se encuentran fuera de éste lo empujan continuamente hacia el centro del mismo. Los planetas, agregados estables de corpúsculos, giran alrededor del centro del vórtice sobre trayectorias casi circulares a causa de una serie de choques similares.

El rápido y constante movimiento de agitación que poseen los centros de los vórtices produce una vibración continua que se transmite a través de todo el espacio bajo la forma de ondas que parten de su centro. Según Descartes, esta vibración no es más que la luz constantemente emitida por los soles o estrellas que ocupan los centros de los vórtices. Así pues y en apariencia, partiendo de premisas corpusculares se ha derivado la existencia de una multitud infinita de sistemas planetarios centrados en estrellas. Las consecuencias que extrae Descartes de tales premisas no se limitan a consideraciones sobre los fenómenos celestes. Por ejemplo, explica el movimiento de la luna, las mareas y el movimiento de los proyectiles mediante la situación alrededor de cada planeta de un conjunto de pequeños vórtices subsidiarios. Los choques corpusculares dentro de estos pequeños vórtices son quienes mantienen la luna en movimiento y dirigen hacia la superficie terrestre los proyectiles lanzados. En el universo cartesiano, el peso, el movimiento, la luz y otras apariencias sensibles son imputables, en último análisis, a las colisiones corpusculares regidas por las leyes del movimiento y de la interacción.

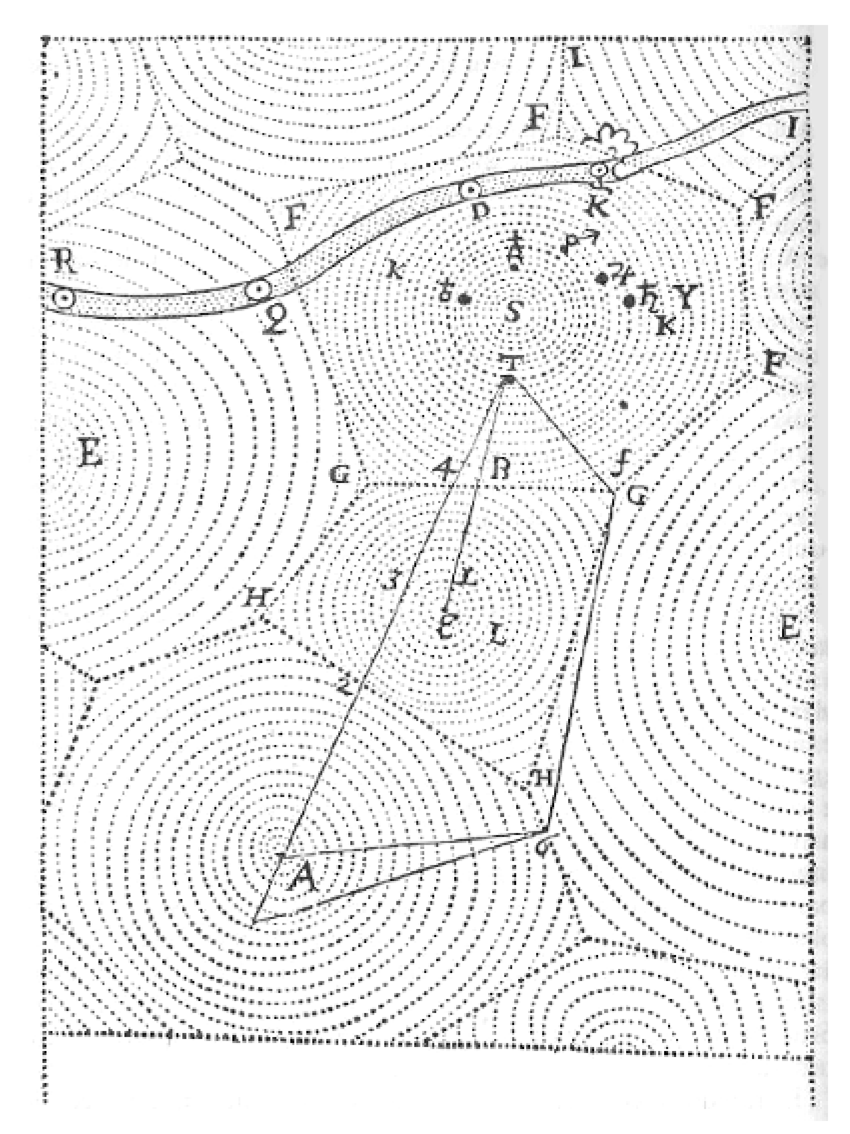


FIGURA 47. — La cosmología de los torbellinos de Descartes, reproducida de su obra *Le monde ou le traité de la lumière*. Los puntos *S*, *E*, *A* y ε son los centros de los torbellinos. Los rápidos movimientos en torbellino de los corpúsculos centrales los convierten en luminosos, por lo que actúan a modo de estrellas. Los diversos círculos punteados, que no es necesario que conformen circunferencias perfectas, representan los caminos descritos por las corrientes corpusculares, eternamente en rotación, que constituyen el torbellino. Los puntos negros situados alrededor del centro *S* del torbellino son los planetas, que se ven arrastrados a lo largo de sus respectivas órbitas por el movimiento de los torbellinos. El cuerpo *C*, situado en la parte superior del diagrama, es un cometa que atraviesa los diferentes torbellinos en una región en la que su movimiento es demasiado lento para constreñirlo sobre una órbita circular continua. El espacio exterior al diagrama está asimismo lleno de torbellinos y cada uno de ellos, al menos potencialmente, representa la localización de un sistema solar en el seno del universo copernicano de Descartes poblado por una infinidad de mundos.

Es infantil pretender descubrir en la actualidad errores e insuficiencias en la cosmología cartesiana de los torbellinos, así como en la astronomía, la óptica, la química, la fisiología, la geología y la dinámica que de aquélla dedujo. Su visión del mundo estaba llena de inspiración y amplitud de miras, pero el pensamiento crítico se encontraba prácticamente ausente de toda su obra; sus leyes sobre la colisión entre corpúsculos constituyen uno de los innumerables ejemplos. Sin embargo, en la historia de la ciencia durante el siglo XVII los diversos aspectos parciales del sistema de Descartes tuvieron mucho menos importancia que su obra considerada globalmente. Sus brillantes sucesores, a cuya cabeza cabe colocar a Christian Huygens, se inspiraron más en ideas subyacentes a la obra del gran filósofo que en sus desarrollos detallados. Pudieron cambiar —como de hecho hicieron— sus leyes sobre las colisiones, su descripción de los vórtices y sus leyes para la propagación de la luz, pero jamás pusieron en duda la concepción cartesiana del universo como una máquina corpuscular regida por unas pocas leyes corpusculares específicas. Esta concepción guió las investigaciones encaminadas a elaborar un universo copernicano coherente durante más de medio siglo. Se hace muy difícil considerar como simple coincidencia que este concepto fundamental de la estructura adecuada a un universo copernicano se viera tan ampliamente influenciada por una antigua cosmología que el propio copernicanismo había contribuido a popularizar.

El sistema solar mecánico

Son dos, y completamente separadas, las trayectorias históricas que conducen del cosmos heliocéntrico finito de Copérnico al universo newtoniano que dio su forma definitiva al revolucionario cambio astronómico. Las relaciones, ilustradas en líneas precedentes, entre el copernicanismo y la filosofía corpuscular constituyen una de tales trayectorias. La otra se conforma a través de toda una serie de tentativas encaminadas a resolver el problema físico más acuciante que planteó el copernicanismo: ¿qué provoca el movimiento de los planetas? Ambas

trayectorias tienen sus comienzos un siglo después de la muerte de Copérnico. Su origen común aparece explícitamente en la nueva perspectiva científica creada cuando Kepler, Bruno y otros separaron en la obra de Copérnico los elementos realmente nuevos de los de procedencia aristotélica para volver a converger en la formulación definitiva de la estructura del universo copernicano elaborada por Newton, a la que ambas corrientes aportaron sus elementos esenciales. Pero si exceptuamos sus puntos de partida y de llegada, lo cierto es que ambas trayectorias estuvieron casi siempre separadas, aunque un asombroso paralelismo haya dado pruebas ocasionales de que iban en una misma dirección.

La explicación física del movimiento planetario no era un problema sin precedentes. Tanto Aristóteles como Ptolomeo o los astrónomos medievales se habían mostrado totalmente incapaces de especificar las causas físicas de las irregularidades de segundo orden en los movimientos de los planetas, pero al menos la ciencia tradicional había explicado la deriva media hacia el este que presentan todos los planetas en su recorrido a lo largo de la eclíptica. Los planetas y las esferas que los contenían estaban constituidos por un elemento celeste perfecto cuya naturaleza se ponía de manifiesto a través de rotaciones eternas alrededor del centro del universo.

Copérnico había intentado conservar esta explicación tradicional del movimiento planetario. No obstante, la idea de unos movimientos celestes naturales encajaba mucho mejor en el marco de un universo geocéntrico que en el de otro heliocéntrico, por lo que no tardaron en manifestarse las incongruencias que introducía la propuesta de Copérnico. Incluso para explicar la deriva de los planetas hacia el este, el sistema copernicano exigía que cada una de las partículas de la tierra girara naturalmente alrededor de dos centros distintos, el centro inmóvil del universo y el centro móvil de la tierra. Cada partícula de un satélite, como la Luna, se veía regida simultáneamente por, al menos, tres centros: el centro del universo, el del correspondiente planeta y el del propio satélite. En consecuencia, el copernicanismo ponía en entredicho la verosimilitud de los movimientos circulares automantenidos al agruparlos y vincularlos simultáneamente a numerosos centros fijos y móviles. Por otro lado, la multiplicidad y los

movimientos de los diferentes centros privaban a los movimientos copernicanos de toda relación fija con la geometría intrínseca del espacio. En la física aristotélica, todos los movimientos naturales tenían lugar ya en dirección hacia el centro del universo —o en este mismo sentido pero en dilección opuesta—, ya alrededor de su centro. A pesar de tratarse de un simple punto geométrico, podía pensarse que dicho centro desempeñaba un papel causal específico, pues era único y determinado de una vez por todas por su relación con los límites del espacio. En cambio la propuesta de Copérnico exigía que ciertos movimientos naturales estuvieran regidos por centros móviles, con lo que ya perdían toda posibilidad de actuar causalmente sólo en función de su posición geométrica.

A finales del siglo XVI y comienzos del XVII otras nuevas doctrinas astronómicas contribuyeron a agudizar aún más el problema físico de los planetas. Las nuevas observaciones de cometas y la creciente adhesión al sistema de Tycho Brahe habían convertido en anticuadas todas las esferas celestes, excepto la estelar. Junto con las esferas desaparecía todo el mecanismo físico que hasta entonces había servido para dar cuenta de los movimientos circulares medios de los planetas. No obstante, la desaparición de las esferas no marcó el fin de la influencia del enfoque clásico. En su *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Galileo intentaba todavía elaborar la doctrina física de Copérnico y sostener que incluso sin esferas celestes toda la materia seguiría manteniendo su rotación natural, regular y eterna en un conjunto de círculos compuestos. Pero la brillantez y sutilidad de la dialéctica de Galileo —raramente igualada desde entonces en una obra científica de primera magnitud— no consiguieron enmascarar por mucho tiempo la insuficiencia fundamental de este enfoque. Su *Dialogo* fue importante como factor de primer orden en la divulgación del copernicanismo, pero sus mayores contribuciones a la ciencia se encuentran en otras obras. Después de su muerte el problema físico de los planetas evolucionó en una dirección completamente diferente, pues, antes incluso de la publicación del *Dialogo* galileano, las investigaciones de Kepler habían otorgado una nueva dimensión a los problemas físicos planteados

por el copernicanismo y sugerido, para su resolución, un nuevo conjunto de técnicas.

Al suprimir la profusión de epiciclos y excéntricas, Kepler permitió, por primera vez, someter al análisis físico las apariencias celestes en toda su complejidad. Una explicación que, como las de Copérnico o Galileo, se limitara a tratar de la deriva media de los planetas hacia el este dejó de ser considerada como suficiente, aun cuando pudiera parecer completamente plausible. Antes que las derivas medias, lo que ahora era necesario explicar eran los movimientos elípticos geométricamente simples y precisos. Sin embargo, tuvo que pagarse un alto precio por dichas simplicidad y precisión. Los movimientos elípticos gobernados por la segunda ley de Kepler, al contrario de los movimientos circulares medios de la astronomía clásica, no podían ser naturales al no gozar de simetría con respecto a un centro. En cierto sentido, un planeta que posee un movimiento uniforme sobre un deferente, o incluso sobre un sistema simple epiciclo-deferente, "hace lo mismo" o "se mueve de la misma forma" en cualquier punto de su órbita; era pues fácil concebir que tal movimiento fuera "natural". Por otro lado, un planeta que se mueva obedeciendo las leyes de Kepler cambia de velocidad, de dirección y de curvatura en cada punto de su órbita. Estas variaciones parecen necesitar de la introducción en los cielos de una fuerza que actúe constantemente para cambiar el movimiento del planeta en cada punto de su órbita. Tanto en los cielos como en la tierra, un movimiento asimétrico se explicaba de la forma más natural como el resultado de un impulso o tensión continuados.

En otros términos, la innovación introducida por Copérnico destruye en primer lugar la explicación tradicional dada al movimiento planetario para, a continuación, bajo las modificaciones keplerianas, sugerir un enfoque de la física celeste radicalmente nuevo. Este nuevo enfoque del problema aparece por primera vez dentro de la obra del propio Kepler en las últimas décadas del siglo XVI y las primeras del siglo XVII. En esencia se trataba de invertir los términos de la técnica ya empleada por Copérnico y que Galileo haría revivir al unificar las leyes de las físicas terrestre y celeste. Copérnico y Galileo llevaron a cabo esta unificación aplicando a la tierra el concepto

tradicional de los movimientos celestes circulares naturales. Kepler conseguía idénticos, aunque más felices resultados al aplicar a los cielos el antiguo concepto de los violentos movimientos terrestres gobernados por la acción de una fuerza. Guiado por su permanente concepción neoplatónica del papel desempeñado por el sol, Kepler introdujo fuerzas dimanantes de éste y de los planetas para dar una fundamentación causal al movimiento planetario. En sus obras se estructura por primera vez el sistema solar sobre el modelo de una máquina terrestre. A pesar de todas las imperfecciones inherentes a su ideal original, el futuro estaba con el enfoque kepleriano.

La primera de las fuerzas solares introducidas por Kepler fue el *anima motrix*, brevemente examinada en el capítulo anterior. Dicha fuerza venía materializada por rayos proyectados desde el sol sobre el plano de la eclíptica y arrastrados por aquél durante su permanente rotación. Cuando esta especie de brazos móviles se topaban con un planeta, le empujaban, impulsándole a moverse en un círculo continuo alrededor del sol. Para convertir en una elipse la órbita circular inicial era necesaria la introducción de una segunda fuerza que pudiera hacer variar la distancia entre el sol y el planeta en los diferentes puntos de la órbita. Kepler identificó esta segunda fuerza con el magnetismo, cuyas propiedades habían sido recientemente estudiadas con detalle por el físico inglés William Gilbert y recopiladas en una obra de gran influencia, *De magnete*, publicada en 1600. Gilbert había reconocido que la propia tierra era un enorme imán, y Kepler extendió este resultado a los demás cuerpos del sistema solar. No sólo la tierra, dice Kepler, sino también los planetas y el sol son imanes cuyas atracciones y repulsiones entre los polos determinan las trayectorias seguidas por los planetas.

Pocos fueron los sucesores de Kepler que tomaron su teoría física, cuyos detalles vienen ilustrados en la figura 48, tan en serio como su descripción matemática de las órbitas planetarias. Algunos de sus conceptos dinámicos ya habían periclitado en el mismo momento en que se preocupaba de su elaboración; la rotación del sol es demasiado lenta para explicar los períodos observados de los planetas; la dirección del eje magnético terrestre, determinada gracias a la aguja imantada, no

corresponde a la que permitiría explicar adecuadamente las observaciones astronómicas. En consecuencia, después de la muerte de Kepler el *anima motrix* y el sol magnético hicieron muy escasas apariciones en los escritos científicos del siglo XVII. No obstante, la concepción kepleriana del sistema solar como mecanismo autónomo reaparece una y otra vez, revelándose de gran importancia, desde un doble punto de vista, en el desarrollo del copernicanismo durante dicho siglo.

Ante todo, el sistema físico de Kepler, aunque totalmente independiente de la filosofía corpuscular, reforzó algunas de sus conclusiones más significativas. En particular, proporcionó un segundo camino natural para llegar al concepto de un espacio infinito y neutro. En el mecanismo planetario de Kepler, el movimiento de un planeta sólo de pendía de su relación con otro cuerpo físico, el sol. El magnetismo y el *anima motrix* funcionaban igualmente bien con independencia de la posición ocupada por el sol; es decir, aunque Kepler hubiera decidido mantener el sol en el centro de una esfera estelar finita, este centro se había hecho innecesario. La teoría corpuscular llegaba a idénticas conclusiones, aunque apoyándose en razones completamente diferentes y a través de un camino de razonamiento distinto. Aparentemente, algunas de las consecuencias más sorprendentes de la teoría de Copérnico no podían ser omitidas en ninguno de los enfoques que conducían a la construcción de un universo copernicano coherente.

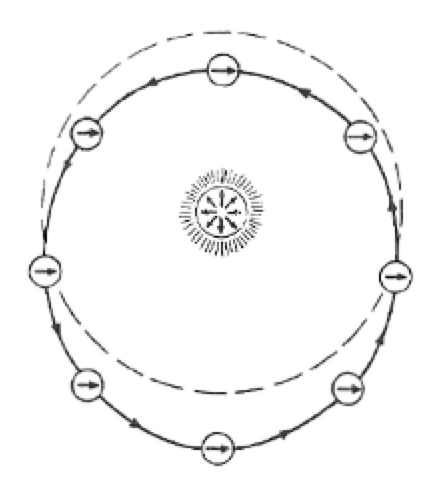


FIGURA 48. — El sistema solar mecánico de Kepler. El sol aparece en el centro del diagrama. De él emanan una serie de rayos, el *anima motrix*, que, en ausencia de otras fuerzas magnéticas,

empujarían al planeta *P* a lo largo del círculo de trazo discontinuo centrado en el sol. Los imanes que, según Kepler, transforman este movimiento circular en un movimiento elíptico, se hallan representados por pequeñas flechas. El polo sur del sol está en su centro, lugar desde donde no ejerce influencia alguna, mientras que el polo norte se halla uniformemente distribuido por su superficie. El eje magnético de la tierra siempre se mantiene prácticamente paralelo a sí mismo durante el movimiento orbital. Cuando el planeta está a la derecha de una recta vertical imaginaria que pasa por el centro del diagrama, su polo sur está más cercano al sol que su polo norte, por cuya razón se ve atraído hacia el sol de forma progresiva. Durante la otra mitad de su recorrido se invierte la situación y el planeta se ve gradualmente repelido. Dado que la influencia del *anima motrix* se manifiesta con mayor intensidad en las proximidades del sol, la velocidad orbital del planeta siempre será inversamente proporcional a su distancia al mismo.

La sustitución por parte de Kepler de los movimientos naturales de la física celeste tradicional —no producidos por fuerza alguna y determinados por el espacio— por los movimientos planetarios violentos producidos por una fuerza— es su segunda aportación de importancia al desarrollo de la ciencia durante el siglo XVII. El sistema solar mecánico de Kepler es el primero de una serie que culmina en el expuesto por Newton en sus *Principia*. Desde el punto de vista histórico, los desarrollos intermedios entre ambos sistemas son de una enorme complejidad, dada su dependencia de la tortuosa evolución y difícil asimilación de un nuevo conjunto de conceptos dinámicos y técnicas matemáticas que por sí mismas darían tema para la elaboración de otra obra. No obstante, desde el punto de vista conceptual, el camino que conduce de Kepler a Newton es relativamente sencillo. Basta con introducir algunas correcciones de importancia para convertir el sistema kepleriano en otro cualitativamente muy similar al de Newton. Estas correcciones son consecuencia directa del reconocimiento de la función de la inercia en la física celeste, aspecto desarrollado en los trabajos de Descartes. Es precisamente la ausencia de este aspecto lo que distingue el sistema solar mecánico de Kepler de los sistemas similares imaginados por los predecesores inmediatos de Newton. Dos de tales sistemas, diseñados por el italiano G. A. Borelli (1608-1679) y por el inglés Robert Hooke (1635-1703), nos acercan en grado sumo a los rasgos cualitativos del sistema newtoniano.

El concepto que tenía Borelli del movimiento inercial era mucho menos elaborado que el de Hooke, con lo que su teoría planetaria se situaba en una

línea muy próxima a la de la emitida por Kepler. A diferencia de éste, Borelli se dio cuenta de que no era necesario mantener constantemente la acción de una fuerza sobre los planetas para impedir que se detuvieran. Sin embargo, mantuvo una especie de *anima motrix* para explicar la variación en la velocidad de un planeta en función de su distancia al sol, y en ciertas ocasiones también parece haber pensado que el *anima motrix* empujaba permanentemente a los planetas. Su ruptura con Kepler (y Aristóteles) fue mucho más radical en otros aspectos. En particular, Borelli reconoció (y lo demostró mediante el modelo que se describe en la figura 49) que un impulso como el proporcionado por el *anima motrix* no podía mantener sobre una órbita cerrada a un planeta en movimiento. Según Borelli, a menos que pudiera disponerse de otra fuerza capaz de atraer los planetas hacia el sol, éstos se desplazarían según una línea recta tangente a su órbita, con lo que acabarían por abandonar de forma definitiva el sistema solar. Así pues, para conseguir la estabilidad orbital, Borelli introdujo una segunda fuerza que se ocupaba constantemente de desviar el planeta de su trayectoria rectilínea y atraerlo hacia el sol. Borelli empleó imanes para simular dicha fuerza, con lo que ponía de manifiesto la pervivencia de restos aristotélicos en la física celeste al verse obligado a introducir una fuerza en sustitución de la tendencia natural de todos los planetas a caer hacia el sol central.

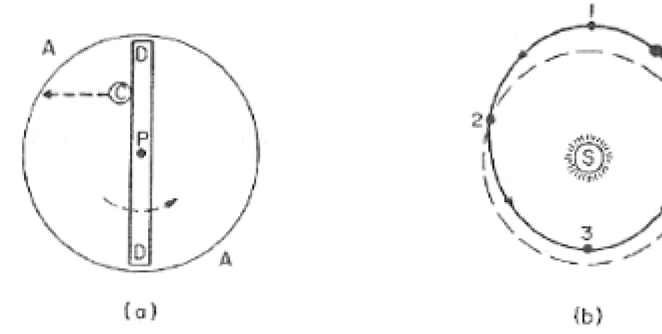


FIGURA 49. — Teoría planetaria de Borelli. El diagrama (*a*) muestra el modelo diseñado por Borelli para el mecanismo planetario; un brazo giratorio *DD* arrastra un tapón *C* alrededor del cuenco *AA* en sentido inverso al de las agujas de un reloj. Cuando el brazo gira a gran velocidad, el tapón, que por inercia tiende a moverse en línea recta, describe una espiral que se abre hacia los bordes del cuenco. Si el brazo *DD* gira lentamente, el tapón describe una espiral dirigiéndose hacia el centro del cuenco, pues la ligera tendencia centrífuga provocada por la rotación del brazo se ve largamente compensada

por la atracción que se manifiesta entre sendos imanes instalados en *C* y en *P*. A una determinada velocidad intermedia adecuada, las tendencias centrípeta y centrífuga se compensan exactamente y el tapón se mueve a lo largo de un círculo: la órbita copernicana por excelencia.

El diagrama (*b*) ilustra la deducción borelliana de una órbita elíptica. Cuando el planeta se mueve sobre el círculo en trazo discontinuo, la tendencia centrífuga provocada por el *anima motrix* compensa exactamente la tendencia del planeta a caer hacia el sol; por consiguiente, la órbita planetaria es circular. Si ahora colocamos el planeta en la posición 1, sobre la curva de trazo continuo, su movimiento será más lento, correspondiéndose a una rotación más lenta del brazo *DD* en el diagrama (*a*), ya que el *anima motrix* ejerce un influjo menor a medida que aumenta la distancia al sol. Como consecuencia de todo ello, el planeta empezará a describir una espiral interior que se cierre sobre el sol a lo largo de la línea de trazo continuo. Después de cortar la línea de trazo discontinuo en 2, cuando el planeta alcance la posición 3 verá aumentada su velocidad a causa del incremento en la influencia del *anima motrix*, con lo que tendrá suficiente impulso para sobreponerse a la deriva que le arrastraba hacia el interior. A partir de aquí el planeta empieza a alejarse del sol a lo largo de una espiral que lo lleva de nuevo hasta el punto 1. Borelli esperaba que la órbita resultante de tal mecanismo fuera una elipse.

Borelli expuso su sistema solar en una obra publicada en 1666, el mismo año en que Robert Hooke consiguió demostrar finalmente el completo paralelismo entre los movimientos celestes y terrestres. Muy influenciado por la obra de Descartes, Hooke partió del principio de inercia y de la identidad de las leyes que regían las físicas celeste y terrestre, consiguiendo como resultado deshacerse a un mismo tiempo del *anima motrix* y de los vestigios de las tendencias naturales al movimiento. Según Hooke, un planeta debía proseguir indefinidamente su movimiento uniforme a través del espacio, pues nuestros sentidos no nos revelan la existencia de nada que lo empuje o tire de él. Pero puesto que los movimientos planetarios no se efectúan en línea recta, sino según una curva continua y cerrada alrededor del sol, el testimonio inmediato de nuestros sentidos debe ser erróneo. En consecuencia, cabe suponer que existe un principio de atracción o una fuerza que opera entre el sol y cada uno de los planetas. Una tal fuerza, escribía Hooke, desviaría constantemente a los planetas de su movimiento inercial rectilíneo atrayéndolos hacia el sol, que es todo lo que exigen sus órbitas copernicanas.

La percepción intuitiva que poseía Hooke de un movimiento planetario copernicano viene indicada por el esquema de la figura 50*a*, aunque la hayamos expuesto de forma más explícita que la elaborada por el propio

Hooke. El círculo (que también podría ser una elipse) es la órbita copernicana del planeta; el planeta viene representado sobre el punto *P* de la órbita y se mueve con velocidad constante a lo largo de la misma. Si no existiera ninguna fuerza actuando entre el sol y el planeta, éste seguiría un movimiento rectilíneo con velocidad constante a lo largo de la tangente en *P* a la órbita. Pero si, cuando el planeta está en *P*, es empujado de repente y con viveza hacia el sol, entonces (recuérdese la figura 46) adquiere simultáneamente un movimiento en dirección hacia éste, que en el diagrama adjunto viene representado por el segmento radial de trazo interrumpido. La resultante de ambos movimientos será un nuevo movimiento inercial a lo largo de la flecha que parte de *P* y alcanza nuevamente la órbita real en el punto *P′*. Si al llegar a *P′* el planeta se viera otra vez empujado hacia el sol, comenzaría a desplazarse en dirección a *P″* a lo largo de la flecha que sale de *P′*, pudiéndose continuar este proceso hasta que el planeta retorne finalmente a la posición *P* de partida.

La sucesión de impulsos que acabamos de describir no lleva al planeta a moverse siguiendo la curva regular que representa su órbita, sino un polígono. La línea poligonal representada en la figura 50*a* es una aproximación de la órbita real del planeta, aproximación que puede ser mejorada indefinidamente. Supongamos, por ejemplo, que las tensiones ejercidas sobre el planeta en los puntos *P*, *P′*, *P″*,… se reduzcan de tal forma que en cada uno de ellos el planeta sufra una desviación menor, con lo que retornará mucho antes a su órbita curva en cada uno de los tramos; supongamos también que la serie original de tensiones (cuya intensidad acabamos de reducir) viene complementada por una nueva sucesión de fuerzas que actúan en los puntos situados entre *P* y *P′*, *P′* y *P″*,… El movimiento resultante seguirá efectuándose a lo largo de una línea poligonal, no sobre una elipse o una circunferencia, pero sin duda alguna se aproximará más a estas curvas que en el caso anterior. Cuando se reduce la intensidad de cada una de estas fuerzas atractivas y se aumenta su número, mejora la aproximación. Finalmente, cuando cada una de las tensiones se haga infinitamente pequeña y el número de ellas se haga infinitamente grande, el planeta se verá desviado hacia el sol en todos y cada uno de los

puntos de su trayectoria; si la fuerza que lo desvía tiene en todo momento la intensidad adecuada, la curva resultante será precisamente la deseada, una elipse o una circunferencia.

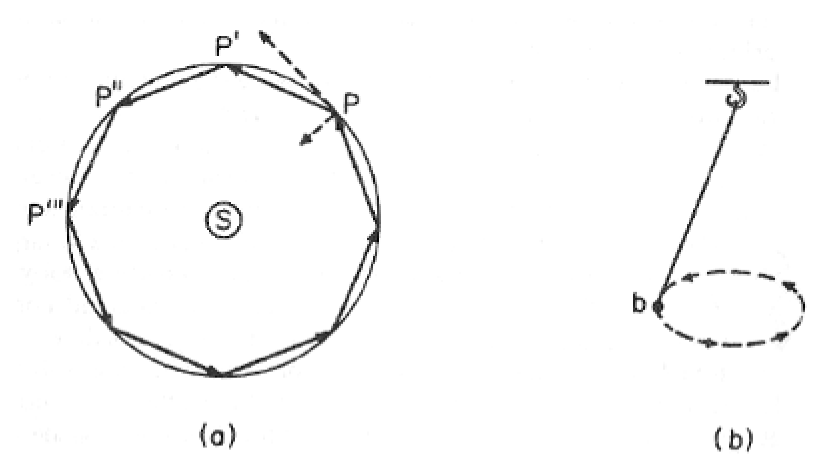


FIGURA 50. — Teoría planetaria de Hooke (*a*) y su demostración por medio del péndulo cónico (*b*). En el diagrama (*a*) el planeta se ve sometido en cada uno de los puntos *P*, *P'*, *P''*,… a un impulso instantáneo que lo dirige hacia el sol *S*. A cada nuevo impulso queda modificada la dirección del movimiento inercial del planeta, y el resultado de la acción de todos ellos es un movimiento a lo largo del perímetro de un polígono. Incrementando el número de puntos en los que el planeta es empujado hacia el centro, crece el número de lados del polígono. En el límite, la acción permanente de una fuerza atractiva central produce una órbita circular. La circularidad de este movimiento puede demostrarse físicamente mediante el aparato representado en el diagrama (*b*). Si sólo recibe un impulso lateral, el plomo *b* del péndulo se verá atraído a causa de su propio peso hacia un punto próximo al centro del círculo de trazo discontinuo. Sin embargo, si lo que se comunica al plomo es un impulso en una dirección perpendicular al hilo del que se halla suspendido, su peso le llevará forzosamente a moverse según una curva. Si la intensidad del impulso es la adecuada, el movimiento del plomo tendrá lugar a lo largo de un círculo horizontal o de una órbita alargada muy similar a una elipse.

Ésta era la hipótesis de Hooke. La vaguedad de sus términos se debía al desconocimiento por parte de Hooke de cómo relacionar la intensidad de una fuerza con la desviación que produce y de cómo generar una elipse a partir de una serie continuada de tales desviaciones. Hooke no pudo demostrar la operatividad de su hipótesis, tarea que fue llevada a cabo por Newton. Sin embargo, Hooke consiguió dar a su idea una forma concreta y aceptable a través de un modelo que, bajo la influencia de una fuerza central, producía movimientos similares a los de los planetas. En 1666 dio término a la conferencia cuyo contenido acabamos de esbozar mediante la

presentación ante sus colegas de la Royal Society de un tipo especial de péndulo, el denominado péndulo cónico (figura 50*b*), construido por un plomo suspendido de un alambre con libertad para moverse en todas direcciones. Cuando se separa ligeramente al plomo de su posición de equilibrio, la única fuerza efectiva que se ejerce sobre él está dirigida aproximadamente hacia el punto que ocupaba en estado de equilibrio. Separado de su posición de equilibrio y abandonado a sí mismo, el plomo oscilará libremente sobre un plano como todo péndulo ordinario, pero si, en lugar de abandonarlo a la acción de su propio peso, se le comunica un impulso perpendicular a la línea que une su posición actual con la de equilibrio, lo que hará el plomo será describir alrededor de dicha posición de equilibrio una curva situada en un plano similar a la órbita de un planeta. Si en el instante de abandonar el plomo le comunicamos la velocidad adecuada en la dirección conveniente, describirá un círculo horizontal. Con una velocidad inicial ligeramente diferente, se desplazará siguiendo una curva alargada similar a una elipse. La fuerza central aplicada al péndulo cónico era incapaz de hacerlo volver al centro. Antes bien, lo que hacía era desviarlo con respecto a éste y hacerlo describir una curva continua. Una fuerza central única había podido producir en el laboratorio una órbita cerrada del tipo adecuado. Una fuerza similar en el cielo, decía Hooke, debía producir efectos idénticos.

El modelo exhibido por Hooke convertía en claro y plausible el vago enunciado de su teoría; pero su importancia aún es mayor por otras razones. Su modelo nos proporciona un ejemplo de primer orden sobre el fecundo y considerable cambio a que se había visto sometido el problema de los planetas bajo la influencia, primero del copernicanismo y, posteriormente, de la combinación de éste y el corpuscularismo. En la obra de Hooke, más incluso que en los trabajos de Kepler y Borelli, la explicación de los movimientos planetarios se ha convertido en un problema de mecánica aplicada, en principio idéntico a los problemas terrestres del péndulo y del proyectil. Las experiencias terrestres proporcionan conocimiento directo sobre los cielos, mientras que las observaciones celestes nos ofrecen información inmediatamente aplicable al estudio de la tierra. Por fin es total

el hundimiento de la dicotomía tierra-cielo, exigido por el *De revolutionibus* y facilitado por el corpuscularismo. Las esferas cristalinas y los restantes dispositivos imaginados desaparecen de escena, siendo reemplazados por un mecanismo de tipo terrestre, del que se ha probado que tiene un funcionamiento tan adecuado como pudieran tenerlo las esferas aristotélicas.

GRAVEDAD Y UNIVERSO CORPUSCULAR

Otro acuciante problema planteado por la innovación copernicana desempeñó un papel básico en la evolución del nuevo universo: ¿por qué los cuerpos pesados caen sobre la superficie de una tierra en movimiento independientemente de la posición que ésta ocupa en el espacio? Si bien los filósofos han sostenido que los científicos nunca deberían plantear preguntas de este tipo —las que inquieren acerca del “por qué”—, lo cierto es que durante el siglo XVII se plantearon, y con notable éxito. Descartes, por ejemplo, contestó a la presente cuestión indicando que los cuerpos libres son empujados hacia la tierra por los impactos procedentes de los corpúsculos de aire del vórtice centrado en la tierra. Esta respuesta gozó de una amplia aceptación hasta después de la muerte de Newton. No obstante, los primeros copernicanos habían elaborado una solución distinta: los cuerpos pesados son atraídos hacia la tierra por un principio de atracción intrínseco que actúa entre todos los elementos de la materia. Una vez modificada, a fin de ajustarse como mínimo a algunas de las principales premisas del corpuscularismo, esta última respuesta, basada en un principio intrínseco de atracción, triunfó frente a la explicación puramente corpuscular elaborada por Descartes y sus discípulos. Hacia finales de siglo, este principio de atracción, actualmente conocido bajo el nombre de gravedad, había proporcionado la clave de la mayor parte de los movimientos terrestres y de todos los celestes.

Como la mayor parte de las ideas generales de la ciencia del siglo XVII, la gravedad también había tenido precursores que se remontaban hasta la

antigüedad. Por ejemplo, algunos de los predecesores de Platón pensaban que las substancias similares debían atraerse o repelerse mutuamente. No obstante, salvo en el estudio del magnetismo y la electricidad, estos principios de atracción y repulsión habían tenido escasas aplicaciones concretas antes de ser traídos a colación por el concepto de una tierra planetaria. La oscura relación entre estas dos ideas aparentemente tan dispares, la de gravedad y la de una tierra planetaria, aparece con toda claridad y en época muy temprana en un pasaje que ya hemos citado anteriormente de los comentarios de Nicolás de Oresme al tratado *Del cielo* aristotélico (p. 126). Podrían existir, dice Oresme, varias tierras en el espacio, pero, en este caso, las piedras caerían sobre la tierra porque la materia se reúne naturalmente con la materia, no porque tienda a desplazarse hacia el centro geométrico del universo.

En el Libro Primero del *De revolutionibus*, una necesidad análoga suscita una tesis muy similar a la de Nicolás de Oresme. "Me parece", dice Copérnico "que la gravedad [que aquí significa simplemente peso] no es más que una tendencia natural que el Creador ha dado a las diferentes partes de los cuerpos para que se unan formando una esfera" (cf. más atrás, p. 166). También Kepler elaboró la idea de un principio de atracción que actuara entre la tierra y sus partes, sugiriendo a la vez que este mismo principio podía actuar, recíprocamente, entre la tierra y la luna. Kepler sólo sintió la necesidad de introducir fuerzas celestes especiales como el *anima motrix* al tomar en consideración los cuerpos situados fuera del mundo sublunar. Hasta que Descartes publicó en 1644 la explicación corpuscular de la gravedad, la mayor parte de los copernicanos continuó explicando la caída de las piedras mediante la ayuda de un dispositivo similar al de Kepler. Presuponían la existencia de un principio intrínseco de atracción, parecido al magnetismo, mediante el cual la tierra atraía a las piedras y éstas atraían a la tierra, o, de otro modo (lo que sólo puede tomarse como proposición equivalente para los objetivos que ahora nos ocupan), que las piedras poseían una tendencia intrínseca a moverse hacia el centro físico de la tierra.

Estas explicaciones copernicanas de la caída de los cuerpos fueron rápidamente aplicadas durante la segunda mitad del siglo al nuevo problema que planteaba la asimilación del concepto de movimiento inercial. Descartes, y posteriormente Borelli, Hooke, Huyghens y Newton, reconocieron que para describir una órbita cerrada alrededor del sol un planeta debe "caer" continuamente hacia éste, transformando así su movimiento inercial rectilíneo en una curva. Una vez reconocida la necesidad de dar una explicación a esta "caída", cada copernicano adaptó al caso celeste una variante de su explicación terrestre de la caída de los cuerpos. Ya hemos indicado que los planetas de Descartes eran empujados hacia el sol por los choques corpusculares, que los de Borelli tenían una tendencia natural a moverse hacia el sol y que los de Hooke eran atraídos hacia éste por una atracción mutua e intrínseca.

No obstante, casi simultáneamente, Hooke y Newton dieron un paso más que tuvo enormes consecuencias. Quizás guiados por la idea cartesiana según la cual el mecanismo que regía las caídas terrestres y celestes era el mismo, sugirieron que la fuerza que atraía los planetas hacia el sol y la luna hacia la tierra era la misma atracción gravitacional causante de la caída de piedras y manzanas. Probablemente, jamás sabremos quien de los dos fue el primero en concebir esta idea. Sea como fuere, lo cierto es que Hooke fue el primero en hacerla pública, y su memoria de 1674 aún puede ser leída como una clara descripción de la idea que, una vez cuantitativizada y corpuscularizada por Newton, guió la imaginación científica durante los siglos XVIII y XIX. Hooke escribía:

[En fecha próxima] expondré un Sistema del Mundo que difiere en varios detalles de todos los conocidos hasta ahora, [y] que se ajusta en todos sus extremos a las reglas ordinarias de la mecánica. Se halla fundamentado en tres suposiciones. La primera es que todos los cuerpos celestes, sin excepción alguna, tienen una atracción o gravitación hacia su propio centro, gracias a la cual, no sólo atraen sus propias partes e impiden su desintegración, tal como observamos en el caso de la tierra, sino que también atraen a todos los demás cuerpos celestes que se hallan bajo su

radio de acción. Por consiguiente, no sólo el sol y la luna ejercen influencia sobre el cuerpo y el movimiento terrestres, influencia que se manifiesta de forma recíproca, sino que también Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno ejercen una considerable influencia sobre el movimiento de la tierra en virtud de su fuerza atractiva, del mismo modo que el correspondiente poder atractivo de la tierra tiene una influencia considerable sobre el movimiento de estos planetas. La segunda suposición es que todos los cuerpos que han recibido un movimiento simple y directo continúan moviéndose en linea recta hasta que por la intervención de alguna otra fuerza efectiva son desviados y obligados a describir un círculo, una elipse o cualquier otra curva más complicada. La tercera suposición es que estas fuerzas atractivas son tanto más poderosas en su acción cuanto más próximo a sus centros está situado el cuerpo sobre el que actúan. No he verificado experimentalmente según qué regla de proporcionalidad varían las fuerzas con las distancias, pero es una idea que, seguida como merece serlo, deberá ayudar a los astrónomos a reducir todos los movimientos celestes a una ley determinada, la cual dudo que puedan encontrar jamás prescindiendo de la presente suposición.[7.1]

Las dos primeras "suposiciones" de Hooke son las premisas fundamentales del nuevo universo. La inercia, junto a una sola fuerza atractiva, la gravedad, rigen a un mismo tiempo los movimientos celestes y los de los proyectiles. Los planetas y los satélites no son más que, al menos por vía de implicación, proyectiles terrestres, balas de cañón lanzadas con una velocidad inicial tan grande que nunca acaban por caer sobre la superficie de la tierra, sino que giran continuamente a su alrededor. El propio Newton hizo explícita y familiar esta imagen en su *System of the world* (figura 51). No obstante, las observaciones de Hooke ofrecen algo más que simples fundamentos conceptuales. El pasaje que acabamos de citar también pone de manifiesto dos de los principales problemas que quedaban por resolver antes de dar una forma completa y definitiva al nuevo universo. ¿Cómo varía la fuerza gravitacional entre los cuerpos que se atraen en función de la distancia que los separa? ¿Cómo puede emplearse

un conocimiento de esta ley de atracción para predecir los movimientos en la tierra y en el cielo?

El propio Hooke no pudo hacer nada para resolver estos problemas. No poseía un suficiente dominio de las matemáticas como para deducir la ley de atracción que regía la descripción kepleriana de las órbitas planetarias; los instrumentos que colocó en el punto más elevado de la catedral de San Pablo y en el fondo de varias minas eran demasiado poco sensibles para detectar las pequeñas variaciones de la gravedad en las proximidades de la superficie de la tierra. A pesar de que Hooke y sus contemporáneos nada sabían al respecto, Isaac Newton (1642-1727) ya había llegado por caminos independientes a una buena parte de las concepciones cualitativas de aquél. Por otra parte, si concedemos crédito a la posterior datación que dio Newton de sus descubrimientos, nos damos cuenta de que ya se había servido de estas ideas para determinar la regla de proporcionalidad de la atracción gravitacional ocho años antes de que Hooke escribiera el pasaje anteriormente citado.



FIGURA 51. — Descripción newtoniana de un proyectil como un satélite. La longitud de la trayectoria crece con la velocidad inicial aplicada al proyectil, de tal modo que cada vez va más lejos alrededor de la superficie curva de la tierra. Cuando la velocidad es suficientemente grande, el proyectil no cae sobre la tierra, sino que continúa moviéndose según una órbita aproximadamente circular.

Cuando alrededor de 1666 Newton centró su atención en este problema, ya consiguió determinar matemáticamente en qué grado un planeta debe “caer” hacia el sol, o la luna hacia la tierra, para mantenerse estable en una órbita circular determinada. Posteriormente, una vez hubo descubierto que

los valores matemáticos que regían la caída variaban en función de la velocidad del planeta y del radio de su órbita circular, Newton pudo deducir dos consecuencias físicas de extraordinaria importancia. De un lado, estableció que si la velocidad de un planeta y el radio de su órbita están vinculados entre sí por la tercera ley de Kepler, la atracción que tira del planeta hacia el sol debe decrecer en razón inversa al cuadrado de la distancia entre ambos. Así pues, un planeta situado a doble distancia del sol sólo necesita una cuarta parte de fuerza atractiva para permanecer en su órbita circular con la misma velocidad observada. El segundo de los descubrimientos de Newton es igualmente de gran alcance. Se percató de que esta misma ley que regía la atracción entre el sol y los planetas explicaba perfectamente bien la diferencia entre las velocidades con que "caían" hacia la tierra la distante Luna y una piedra. Trece años después volvió a abordar la cuestión a causa de una controversia con Hooke. En esta ocasión generalizó aún más sus resultados anteriores y demostró que una ley de variación inversamente proporcional al cuadrado de la distancia explicaría simultáneamente con toda precisión las órbitas elípticas especificadas por la primera ley de Kepler y la variación de velocidad descrita en la segunda.

Estas deducciones matemáticas no tenían precedente alguno en la historia de las ciencias. Sobrepasaban todos los demás resultados obtenidos partiendo de la nueva perspectiva abierta por el copernicanismo. La imposibilidad de exponerlas más detalladamente en el marco de un tratado elemental constituye la mayor distorsión introducida en este abreviado epílogo a la revolución copernicana. La ley del inverso del cuadrado de Newton y las técnicas matemáticas que la vinculaban al movimiento permitían calcular por primera vez con gran precisión las formas de las trayectorias y las velocidades de los cuerpos celestes y de los proyectiles terrestres. La similitud entre la bala de cañón, la tierra, la luna y los planetas había pasado del dominio de la especulación al del número y la medida. La ciencia del siglo XVII alcanzó su apogeo con este descubrimiento. No obstante, de forma bastante curiosa, este clímax no marcó el término de la revolución copernicana. A pesar de su alcance y su fuerza, ni Newton ni

muchos de sus contemporáneos se sintieron satisfechos con el concepto de gravitación y su capacidad operativa. Hacia 1670 la filosofía corpuscular seguía siendo el marco metafísico en que se desenvolvía toda investigación de vanguardia, y el concepto de gravitación violaba las premisas corpusculares en dos aspectos esenciales. Debía transcurrir aún medio siglo de investigaciones y controversias antes de alcanzarse la reconciliación. En el nuevo universo que finalmente emergió, tanto el corpuscularismo como el concepto de gravitación newtoniano habían sido modificados una vez más.

Newton, cuya constante fidelidad al corpuscularismo queda repetidamente atestiguada por sus cartas y cuadernos de notas, era en extremo consciente del inadecuado carácter metafísico de su concepto de gravedad. Esto explica quizá, al menos en parte, su dilación en hacer públicos los resultados de sus primeros trabajos sobre física ce leste. De hecho, los *Principia* no aparecieron hasta que Newton, en 1685, consiguió resolver uno de los conflictos aparentes entre la gravitación y la filosofía corpuscular tras haber derrochado esfuerzos en vano para resolver el otro.

El primer conflicto entre las premisas corpusculares y la primitiva formulación dada por Newton a su teoría de la gravitación aparece en los cálculos que efectuó en 1666, donde comparaba las respectivas atracciones terrestres de una piedra y de la luna. Newton concluyó de la comparación entre las velocidades de caída de la piedra y la luna que la atracción ejercida por la tierra sobre una masa unidad exterior a ella variaba en razón inversa al cuadrado de la distancia entre dicha masa y *el centro de la tierra*. Se trataba de una idea muy simple y en completo acuerdo con la experiencia. Por otro lado, se podía aplicar con brillante éxito a todo el sistema solar. Pero no era una ley corpuscular. Para un partidario de la teoría corpuscular, la atracción terrestre sobre un corpúsculo externo sólo puede ser determinada añadiendo unas a otras las atracciones que ejerce sobre él cada uno de los corpúsculos que constituyen la tierra (figura 52). Si el corpúsculo exterior está situado a gran distancia de la tierra, la operación es fácil, pues en tal caso puede considerarse que el corpúsculo en cuestión equidista de todos y cada uno de los que conforman nuestro planeta. Por consiguiente,

sea cual fuere su localización, cada corpúsculo terrestre ejerce aproximadamente idéntica fuerza sobre el corpúsculo exterior, y la fuerza total debe ser muy similar a la que se ejercería si todos los corpúsculos que forman la tierra se vieran ligeramente desplazados hacia su posición media concentrándose en el centro de nuestro planeta. Así pues, si la atracción ejercida por las partículas individuales se rige por la ley del inverso del cuadrado de la distancia, la atracción de los cuerpos de gran tamaño actuando a grandes distancias debe regirse por la misma ley.

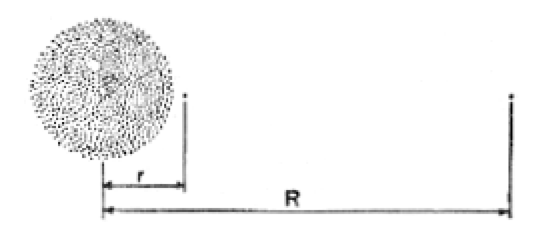


FIGURA 52. — Corpuscularización de la ley del inverso del cuadrado. Si la gravedad es una atracción corpuscular, la atracción total de la tierra sobre un corpúsculo exterior a ella debe ser igual a la suma de las atracciones entre cada corpúsculo terrestre y el corpúsculo exterior. No está en absoluto claro que esta atracción total pueda variar de manera sencilla con la distancia. No obstante, Newton consiguió demostrar que si la atracción entre corpúsculos individuales varia en razón inversa al cuadrado de la distancia que los separa, la atracción total entre la tierra y un corpúsculo exterior variará en razón inversa al cuadrado de la distancia de este corpúsculo al centro de la tierra.

No obstante, la adición de estas fuerzas microscópicas no es tan simple cuando el corpúsculo exterior está muy próximo a la superficie terrestre. En tal caso, parece poco probable que la ley del inverso del cuadrado pueda seguir aplicándose de la forma precedente. Cuando está muy cerca de la superficie terrestre, el corpúsculo exterior se halla millones de veces más cerca de los corpúsculos de la tierra próximos a él que de los corpúsculos terrestres situados en las antípodas (figura 52). Los corpúsculos cercanos ejercen, consiguientemente, una fuerza muchísimo mayor que los más alejados. En apariencia, serán aquellos los responsables de casi la totalidad de la fuerza ejercida, y la atracción total aumentará con gran rapidez a medida que el corpúsculo exterior vaya acercándose a la superficie terrestre. Parece ser que la distancia al *centro de la tierra* es casi irrelevante para el cálculo de la fuerza total ejercida sobre, por ejemplo, una manzana. Newton consiguió demostrar que la anterior suposición no es aplicable a los hechos

observados. En 1685 probó que, sea cual sea su distancia al corpúsculo exterior, las partículas terrestres pueden ser tratadas como si se hallaran todas ellas agrupadas en el centro geométrico de la tierra. Este sorprendente descubrimiento, que por fin ubicaba la gravedad en los corpúsculos individuales, fue el preludio, y quizá el requisito previo, para impulsar la publicación de los *Principia*. Por fin podía demostrarse que tanto la ley de Kepler como el movimiento de un proyectil podían ser explicados como el resultado de una atracción innata entre los corpúsculos elementales que constituían el mundo.

Sin embargo, esta concepción corpuscular de la gravitación no satisfizo a Newton. En realidad, hasta bien entrado el siglo XVIII pocos fueron los científicos que la encontraron satisfactoria. Para la mayor parte de los científicos del siglo XVII adheridos a las tesis corpuscularistas, la gravitación como principio de atracción innata les parecía algo demasiado próximo a las unánimemente rechazadas "tendencias al movimiento" de los aristotélicos. La gran virtud del sistema cartesiano residía en haber eliminado por completo estas "cualidades ocultas". Los corpúsculos de Descartes eran totalmente neutros; el propio peso había sido explicado como el resultado de choques; la idea de un principio autónomo de atracción que actuaba a distancia se mostraba como una regresión a las "simpatías" y "poderes" místicos que tanto habían contribuido a la ridiculización de la ciencia medieval. El propio Newton suscribía por completo este punto de vista. Fueron diversas las tentativas que llevó a cabo para encontrar una explicación mecánica de la atracción, y aunque finalmente tuvo que admitir su fracaso en tal empresa, continuó sosteniendo que alguien lo conseguiría en el futuro y que la causa de la gravedad no era "imposible de descubrir y demostrar".[7.2] Newton insistió una y otra vez en que la gravedad no era innata en la materia. "Decirnos —escribía en su testamento científico colocado como colofón a su *Opticks*— que cada tipo de cosas está dotado de una cualidad específica oculta [tal como la gravedad], a través de la cual actúa y produce efectos sensibles, es no decirnos nada."[7.3]

Creo pues, que no es interpretar erróneamente las intenciones científicas de Newton sostener que su deseo era escribir, tal como Descartes, unos *Principios de filosofía*, pero que su inhabilidad para explicar la gravitación le obligó a limitar su tema a unos *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Las similitudes y diferencias entre ambos títulos son sumamente significativas. Newton parece haber considerado incompleta su obra maestra, los *Principia*, pues en ella sólo ofrece una descripción matemática de la idea de gravedad. A diferencia de los *Principios* cartesianos, no explica por qué el universo es como es, ni pretende hacerlo. En otras palabras, no explica el concepto de gravedad, o, al menos, esto es lo que creía el propio Newton. Aunque la ciencia del siglo XX haya justificado los presentimientos de éste —en nuestros días la gravedad puede ser explicada sin tener que recurrir a un principio innato de atracción que actúa a distancia—, lo cierto es que muy pocos de sus contemporáneos, ni de sus sucesores, se sintieron inclinados a mantener estas sutiles distinciones. O rechazaron por completo la noción de gravedad por considerarla un retorno al aristotelismo, o la aceptaron insistiendo en que Newton había demostrado que la gravedad es una propiedad intrínseca de la materia.

La subsiguiente polémica nada tiene de trivial. Tuvieron que pasar cuarenta años antes de que la física newtoniana desplazara netamente a la cartesiana, incluso en las propias universidades británicas. Algunos de los más destacados físicos del siglo XVIII continuaron buscando una explicación mecánico-corpuscular de la gravitación, aunque sin éxito. Mientras tanto, los *Principia* se habían hecho indispensables para todo científico en razón de su potencial conceptual. Así pues, poco a poco, se fue aceptando el concepto de gravedad y, a despecho de sus detractores, se convirtió en una propiedad intrínseca de los últimos corpúsculos de materia.

Como resultado, se emprendió una revisión a fondo de la filosofía corpuscular a la búsqueda de fuerzas. Newton había dicho en las primeras páginas de los *Principia*:

Varias razones me inclinan a sospechar que […] [los fenómenos de la naturaleza] pueden depender en su totalidad de ciertas fuerzas cuyas causas nos son desconocidas, y bajo cuya acción las partículas de los cuerpos se empujan unas hacia otras para unirse en figuras regulares o bien se repelen mutuamente alejándose entre sí.[7.4]

También hacia el final de su *Opticks* adjuntaba una larga serie de “cuestiones dudosas” sobre los efectos de la acción corpuscular:

Considerando todo esto, me parece sumamente probable que, en un principio, Dios formó la materia en partículas sólidas, macizas, pesadas, impenetrables y móviles, con los tamaños y formas, las propiedades y la proporción dentro del espacio que mejor se ajustara a los fines para los que las había creado […]. Por consiguiente, para que la naturaleza pueda ser perdurable, los únicos cambios que pueden producirse en los seres corpóreos consistirán en diversas separaciones, reagrupamientos y movimientos de estas partículas permanentes […]. Por otra parte, me parece que estas partículas no sólo gozan de una *Vis inertiae* [fuerza inercial] acompañada de las leyes pasivas del movimiento que resulta naturalmente de una tal fuerza, sino que también son movidas bajo la acción de ciertos principios activos, tales como la gravedad y los que producen la fermentación [química] y la cohesión de los cuerpos.[7.5]

Tales afirmaciones, y otras similares, describen el tipo de newtonianismo que tanta influencia ejerció en el pensamiento de los siglos XVIII y XIX. A la muerte de Newton, acaecida en 1727, la mayoría de los científicos y hombres cultivados concebían el universo como un espacio infinito y neutro donde moraban un número infinito de corpúsculos con movimientos sometidos a algunas leyes pasivas, como la de la inercia, y a algunos otros principios activos, como el de la gravedad. Newton había deducido de tales premisas y con una precisión sin precedentes la mayor parte de los fenómenos ópticos conocidos, así como los pertenecientes a las

mecánicas celeste y terrestre, entre los que se incluían el comportamiento de las mareas y la precesión de los equinoccios. Sus sucesores se esforzaron, partiendo del punto en que Newton había abandonado sus investigaciones, en descubrir las otras leyes sobre fuerzas necesarias para explicar fenómenos tales como el calor, la electricidad, el magnetismo, la cohesión de los cuerpos y, sobre todo, la combinación química. El ruinoso universo aristotélico había sido por fin reemplazado por una visión del mundo a la vez amplia y coherente. Se abría un nuevo capítulo en la historia del desarrollo de la comprensión de la naturaleza por parte del hombre.

EL PENSAMIENTO NUEVO

Con la construcción del universo corpuscular newtoniano se completa la revolución conceptual iniciada por Copérnico un siglo y medio antes. En este nuevo universo quedaban por fin resueltos los problemas planteados por la innovación astronómica de Copérnico, y la astronomía copernicana se convertía por primera vez en algo aceptable tanto desde el punto de vista físico como desde el cosmológico. Una vez más se definió la relación existente entre la tierra y los demás cuerpos del universo. Había una nueva explicación para el retorno a su punto de partida de los proyectiles lanzados al espacio, comprendiéndose ahora que, para que así fuera, el proyectil no debía ser lanzado exactamente según la vertical. Sólo cuando gracias a la aceptación y difusión de este nuevo armazón conceptual se hicieron totalmente dignas de crédito las tesis copernicanas, desaparecieron los últimos reductos de oposición a la idea de una tierra planetaria. Sin embargo, el universo newtoniano no era un simple marco donde encuadrar la tierra planetaria de Copérnico, sino algo mucho más importante, una nueva forma de observar la naturaleza, el hombre y Dios: una nueva perspectiva científica y cosmológica que a lo largo de los siglos XVIII y XIX enriquecería una y otra vez las ciencias a la par que remodelaría las filosofías política y religiosa.

Los mismos principios newtonianos que finiquitaron la revolución astronómica al proporcionar una explicación económica y plausible de las leyes de Kepler, también proporcionaron a la propia astronomía un gran número de técnicas de investigación nuevas y potentes. Por ejemplo, cuando las cuantitativamente perfeccionadas técnicas de observación telescópica mostraron que los planetas no obedecen con exactitud a las leyes enunciadas por Kepler, la física newtoniana permitió, en un primer momento, explicar las desviaciones menores de los planetas con respecto a sus órbitas elípticas fundamentales, posibilitando posteriormente la previsión de las mismas. Tal como ya había indicado Newton en su elaboración de las leyes keplerianas, éstas sólo podían ser rigurosamente aplicadas bajo el supuesto de que la única fuerza atractiva sobre los planetas proviniese del sol. Sin embargo, los planetas también se atraen unos a otros, en especial cuando se aproximan y cruzan, y esta atracción suplementaria es la que los desvía de su órbita fundamental y modifica sus velocidades. Las ampliaciones matemáticas a la obra de Newton durante el siglo XVIII permitieron a los astrónomos prever dichas desviaciones con una gran precisión, mientras que durante el siglo XIX, la inversión de esta técnica predictiva fue la responsable de uno de los más grandes triunfos astronómicos. En 1846, Le Verrier en Francia y Adams en Inglaterra predijeron la existencia y la órbita de un planeta hasta entonces desconocido, responsabilizándole de las irregularidades no explicadas que se observaban en la órbita de Urano. Dirigidos los telescopios hacia el cielo, no tardó en descubrirse el nuevo planeta —apenas visible— a menos de un grado de distancia de la posición prevista por la teoría newtoniana; se le asignó el nombre de Neptuno.

Podrían multiplicarse casi indefinidamente los ejemplos sobre la fecundidad de la teoría newtoniana en los dominios astronómicos. Pero no fue éste el único campo científico afectado por la nueva teoría. Sólo a título de ejemplo y entre otros muchos, podemos considerar el efecto de la obra de Newton sobre la experimentación química durante el siglo XVIII. Aun en contra de su intención explícita, Newton llevó a la mayor parte de sus sucesores a creer que la gravedad y, por consiguiente, el peso eran

propiedades intrínsecas de la materia. Se le asignaba así al peso un nuevo significado en el ámbito científico, convirtiéndose por primera vez en la historia en una inequívoca forma de medir la cantidad de materia, con lo que la balanza pasó a ser un instrumento fundamental en el estudio de la química. Sólo la balanza podía indicar a los químicos las cantidades de materia que intervenían en una reacción química. Los químicos habían creído desde la antigüedad que la cantidad de materia se conservaba durante una reacción química, aunque jamás existió una medición generalmente admitida de tales “cantidades de materia”. En el contexto del pensamiento aristotélico, e incluso en el del cartesiano, el peso se consideraba, lo mismo que el color, la consistencia o la dureza, una característica secundaria de la materia, una característica que podía cambiar por un proceso de reacción química. Así pues, el concepto de peso como instrumento universalmente admitido para “equilibrar” reacciones químicas y determinar si se había ganado o perdido materia por una causa desconocida durante tales reacciones fue parcialmente derivado de la teoría newtoniana. Este nuevo instrumento fue una de las numerosas bases importantes en la revolución surgida en el pensamiento químico durante las últimas décadas del siglo XVIII en torno a los trabajos de francés Lavoisier.

Se necesitaría todo un libro para transformar y multiplicar estos dos ejemplos aislados —el descubrimiento de Neptuno y el nuevo significado dado al peso— en una discusión equilibrada sobre los efectos del nuevo universo sobre el pensamiento científico, y es prácticamente seguro que la discusión pecara de incompleta. También el pensamiento extracientífico se vio transformado por el vasto entramado de conceptos que se desarrolló alrededor del nuevo universo. Dentro del universo infinito y poblado por innumerables mundos de los científicos y filósofos del siglo XVII, las ubicaciones del paraíso en el cielo y del infierno bajo la corteza terrestre se convirtieron en simples metáforas, eco moribundo de un simbolismo que había tenido una significación geográfica muy concreta en épocas pretéritas. Paralelamente, la concepción de un universo constituido por átomos, cuyo movimiento eterno obedece a unas pocas leyes promulgadas por Dios, había cambiado para muchos hombres la imagen de la propia

divinidad. En el universo-reloj, Dios aparecía muy a menudo como simple relojero, como el Ser que había diseñado sus componentes atómicos y establecido las leyes de su movimiento, abandonándolo a sí mismo después de puesto en marcha. El deísmo, versión elaborada de este punto de vista, fue un ingrediente de primer orden en el pensamiento de finales del siglo XVII y del siglo XVIII. A medida que progresaba, iba declinando la creencia en los milagros, pues éstos no eran otra cosa que una interrupción de las leyes mecánicas, una intervención directa de Dios y de los ángeles en los asuntos terrestres. Hacia finales del siglo XVIII, eran muchos los hombres, científicos o no, que consideraban innecesario seguir planteando el problema de la existencia de Dios.

También pueden descubrirse otros reflejos de la nueva ciencia en la filosofía política de los siglos XVIII y XIX. Varios autores contemporáneos han subrayado recientemente el significativo paralelismo que existe entre las ideas dieciochescas de un sistema solar mecanicista y de una sociedad que “funciona como una seda”. Por ejemplo, el sistema de cheques y saldos fue incorporado a la Constitución de los Estados Unidos con el objeto de dar a la nueva sociedad americana el mismo tipo de estabilidad frente a la presencia de fuerzas de ruptura que la que proporcionaba la exacta compensación entre fuerza de inercia y atracción gravitacional al sistema solar de Newton. Asimismo, la corriente dieciochesca tendente a derivar las características de una buena sociedad de las características innatas del individuo puede haberse nutrido en parte del corpuscularismo del siglo XVII. En el pensamiento político de los siglos XVIII y XIX el individuo aparece una y otra vez como el átomo que conforma la sociedad-máquina. En los primeros párrafos de la Declaración de Independencia, Jefferson hacía derivar el derecho a la revolución de los derechos otorgados por Dios, y por tanto inalienables, al átomo social, es decir, el hombre. Esta postura es muy semejante a la adoptada por Newton un siglo antes cuando hacía dimanar el mecanismo de la naturaleza de las propiedades otorgadas por Dios, y por consiguiente innatas, al átomo físico individual.

Estos pocos ejemplos, aunque dispares y poco desarrollados, indican que nuestra historia termina su recorrido con la creación del universo newtoniano. Éste iba a representar para la astronomía copernicana lo que el universo aristotélico había sido para la astronomía geocéntrica. Una y otra visiones globales del mundo vinculaban bajo un solo esquema la astronomía, las demás ciencias y el pensamiento extracientífico; una y otra eran instrumentos conceptuales, medios para ordenar los conocimientos, evaluarlos y adquirir otros nuevos; una y otra dominaron la ciencia y la filosofía de toda una época. Una vez completada esta circunvolución desde una a otra concepción global del mundo, estamos por fin en condiciones de comprender en qué sentido repercutió sobre ella la innovación astronómica de Copérnico. La idea de una tierra planetaria fue la primera ruptura con éxito frente a uno de los elementos constitutivos esenciales de la antigua visión del mundo. Aunque sus objetivos se limitaran a poner en marcha una reforma astronómica, tuvo destructoras consecuencias que sólo podían ser resueltas en un nuevo marco de pensamiento. Los elementos de este nuevo pensamiento no los proporcionó Copérnico; su propia concepción del universo estaba mucho más cerca de la aristotélica que de la newtoniana. No obstante, los nuevos problemas y sugerencias derivados de su innovación constituyen los principales hitos en el desarrollo del nuevo universo suscitado por aquélla. La creación de una necesidad y la colaboración prestada para satisfacerla son las contribuciones de la revolución copernicana a la historia.

Con todo, sus contribuciones históricas no agotan el significado de esta revolución. La revolución copernicana también posee una enorme importancia como factor ilustrativo del continuado proceso cíclico que presenta la adquisición del conocimiento. Los últimos doscientos cincuenta años han probado que la concepción del universo que emergió de la revolución copernicana era un instrumento intelectual mucho más potente que sus equivalentes aristotélico y ptolemaico. La cosmología científica desarrollada durante el siglo XVII y los conceptos de espacio, fuerza y materia inherentes a la misma explicaron con una precisión no soñada en la antigüedad tanto los movimientos celestes como los terrestres. Además,

guiaron numerosos proyectos de investigación en extremo fecundos, descubriendo un cúmulo de fenómenos naturales previamente insospechados y revelando el orden existente en campos de la experiencia totalmente inabordables para espíritus formados en la antigua concepción del universo. Estos resultados son definitivos. Mientras sobreviva la tradición cultural de Occidente, los científicos podrán explicar los fenómenos elucidados por primera vez a través de los conceptos newtonianos, exactamente del mismo modo en que Newton consiguió explicar la más reducida lista de fenómenos previamente elucidados por Aristóteles y Ptolomeo. Así es como progresa la ciencia: cada nuevo esquema conceptual engloba los fenómenos explicados por sus predecesores y se añade a los mismos.

No obstante, aunque la obra de Copérnico y la de Newton tengan un valor permanente, no puede decirse lo mismo con respecto a las ideas que las hicieron posible. Lo único que crece es la lista de fenómenos que necesitan ser explicados; las explicaciones en sí no conocen un proceso acumulativo análogo. A medida que progresa la ciencia, sus conceptos se ven repetidamente destruidos y reemplazados, y en la actualidad los conceptos newtonianos no parece que vayan a constituir una excepción a la regla. Lo mismo que anteriormente había hecho el aristotelismo, la teoría newtoniana ha desarrollado —pero esta vez en el seno de la física— una serie de problemas y técnicas de investigación irreconciliables con la visión global del mundo que los ha engendrado. Desde hace medio siglo nos encontramos en el seno de la revolución conceptual resultante de cuanto acabamos de apuntar, y una vez más se ven modificadas las ideas que tenía el científico (aunque todavía no las del lego) sobre el espacio, la materia, la fuerza y la estructura del universo. Los conceptos newtonianos siguen usándose porque proporcionan un compendio económico de una ingente cantidad de información. Sin embargo, y cada vez de forma más acusada, la única razón que aboga en favor de su utilización es la economía, del mismo modo en que el antiguo universo de las dos esferas sigue siendo empleado por el navegante o por el observador de estrellas. Son una inapreciable

ayuda para la memoria, pero han dejado de ser una guía fiable en la búsqueda de lo desconocido.

Así pues, aunque más potente que sus predecesores, el universo newtoniano tampoco se revela como definitivo. Su historia, considerada como uno de los numerosos capítulos de la evolución del pensamiento humano, no difiere demasiado en cuanto a su estructura de la historia del universo geocéntrico destruido por Copérnico y Newton. Este libro es un largo capítulo dentro de una historia sin solución de continuidad.

APÉNDICE TÉCNICO

I. CORRECCIÓN DEL TIEMPO SOLAR

En los primeros capítulos de este libro hemos admitido que si el día solar aparente se define como el intervalo de tiempo transcurrido entre dos mediodías sucesivos de un lugar, el tiempo que precisan las estrellas para completar su revolución diaria es siempre inferior en 4 minutos (más exactamente, en 3 minutos 56 segundos) a dicho día solar. No obstante, ya hemos indicado en una nota a pie de página en el capítulo 1 la inexactitud de la suposición precedente. Si los intervalos entre mediodías sucesivos de un lugar fueran perfectamente regulares, el tiempo empleado por las estrellas para llevar a cabo una revolución completa variaría de un día para otro. De modo contrario, si se supone que las estrellas describen sus círculos diarios sucesivos en intervalos de tiempo iguales entre sí, la duración del día solar no permanece constante. Este hecho ya era perfectamente conocido en la antigüedad, al menos en la época de Ptolomeo, y es muy probable que con anterioridad a la misma. Para abordar correctamente el problema debemos suponer, tal como lo hicieron los antiguos, que el movimiento aparente de las estrellas es perfectamente regular, de tal forma que éstas nos proporcionen una escala fundamental para la medición del tiempo. Descubriremos entonces dos razones distintas para explicar la observada variación de los intervalos temporales que, en un lugar determinado, separan dos pasos sucesivos del sol por el punto más elevado de su trayectoria diaria.

La primera causa de la irregularidad del tiempo solar aparente es la variación en la velocidad con que el sol parece atravesar las constelaciones zodiacales. Hemos visto en el capítulo 2 que el sol recorre más rápidamente la eclíptica cuando se traslada del equinoccio de otoño al equinoccio de primavera que al efectuar el camino inverso. Así pues, el sol parece perder terreno con mayor rapidez en invierno que en verano en su cotidiana carrera con las estrellas; en consecuencia, si medimos el tiempo tomando como referencia el movimiento de las estrellas, el sol deberá emplear más tiempo en invierno que en verano para pasar de un mediodía al siguiente. Se concluye, pues, que el día solar aparente más largo se dará en mitad del invierno y el más corto en mitad del verano, y así sería en caso de que no entrara en liza ninguna otra causa de irregularidad.

La segunda causa que interviene en la variación del día solar aparente es el ángulo de intersección de la eclíptica y el ecuador de la esfera celeste. Para comprender sus efectos, obsérvese nuevamente la figura 13, capítulo 1, e imaginemos que la totalidad de la esfera celeste se halla cubierta por un sistema regular de meridianos similar al que se dibuja sobre todo globo terrestre. Supongamos además, con el fin de simplificar, que el movimiento del sol a lo largo de la eclíptica es perfectamente regular y que tiene lugar a razón de 1° diario. Puesto que la eclíptica se halla inclinada con respecto al ecuador, el movimiento neto del sol *hacia el este* varía de un día para otro. Cuando el sol está en los solsticios o cerca de ellos, su movimiento aparente con respecto a las estrellas es casi perfectamente paralelo al ecuador celeste. Por otro lado, se estará desplazando en una región de la esfera celeste cuyos meridianos están más próximos unos a otros de cuanto lo están en la zona del ecuador. En consecuencia, el movimiento neto del sol hacia el este es en realidad de algo más de 1° *de longitud celeste* por día, con lo que la esfera celeste debe girar en dirección oeste algo más de 361° para llevar al sol de una altitud máxima a la siguiente. En los equinoccios la situación es totalmente diferente. El sol se desplaza entonces en la región de la esfera celeste en que los meridianos se encuentran más espaciados entre sí. Además el movimiento total del sol, más que hacia el este verdadero, se efectúa hacia el nordeste o el sudeste, por lo que su progresión en dirección

este es algo inferior a 1° diario. En consecuencia, la esfera celeste retorna el sol a su posición de altitud máxima mediante un giro algo inferior a los 361°. Por sí solo, este efecto ya hace que el día solar aparente sea de mayor longitud en los solsticios y más corto en los equinoccios.

Con el fin de corregir las dos irregularidades expuestas, las civilizaciones modernas han adoptado una escala de tiempos conocida bajo el nombre de tiempo solar medio, cuya unidad fundamental es la duración *media* del día solar aparente. Con esta escala de tiempos, las estrellas tienen, por definición, un movimiento perfectamente regular que las lleva a describir sus círculos cotidianos exactamente en 23 horas 56 minutos y 4,091 segundos. No obstante, la escala que regulariza el movimiento estelar hace irregular el movimiento del sol. Por ejemplo, la elevación máxima del sol raramente se da en el mediodía, hora local, medido según la escala de tiempo solar medio. El tiempo indicado por los relojes de sol, los únicos instrumentos que miden directamente el tiempo solar aparente, no transcurre con la misma velocidad que el de nuestros relojes o el anunciado por las señales horarias radiofónicas. En diciembre o en enero, cuando los dos efectos descritos anteriormente actúan acortando el día solar aparente, el intervalo temporal que separa dos pasos consecutivos del sol por su altitud máxima es casi medio minuto inferior al día solar medio. Por otro lado, esta ligera diferencia tiene un efecto acumulativo —el tiempo aparente transcurre más despacio que el tiempo medio durante varios días consecutivos—, de tal forma que hay una estación del año en que el sol alcanza su máxima altitud (mediodía aparente) casi 20 minutos antes del mediodía solar medio. En otras estaciones el tiempo aparente transcurre más rápido que el tiempo medio. Ninguno de ambos tiempos sobrepasa sistemáticamente al otro. Con el paso de los años puede darse el caso de que ambos coincidan, pero esta situación se da en muy raras ocasiones durante todo un día completo. Por lo tanto, para mantener un tiempo preciso para el sol, se hace necesario corregir el reloj solar con la ayuda de una tabla o diagrama similar al representado en la figura 53.

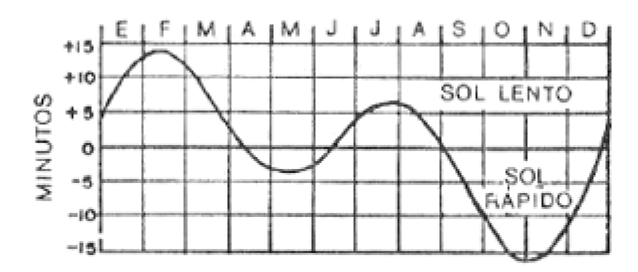


FIGURA 53. — Diagrama de la ecuación de tiempo que nos indica la variación anual de la diferencia entre el tiempo solar medio y el tiempo solar aparente.

En la discusión precedente hemos utilizado el movimiento aparente de las estrellas como una pauta regular de referencia. Está claro que tal elección es arbitraria, al menos desde el punto de vista lógico. Desde este punto de vista igualmente habríamos podido escoger como patrón el movimiento aparente del sol y mostrar que, en la correspondiente escala de tiempos derivada de nuestra nueva elección, las estrellas se desplazan con una velocidad constantemente variable. Sin embargo, elegir el sol como referencia reportaría grandes inconvenientes, tanto para la ciencia como para la vida cotidiana. En este caso, el diagrama de la figura 53 debería aplicarse, no a los relojes solares, sino a los de pulsera y a los demás relojes mecánicos. Por otro lado, físicos y astrónomos se verían obligados a describir la rotación de la tierra sobre su propio eje como un fenómeno de velocidad constantemente variable. La elección del movimiento de las estrellas como referencia evita estos inconvenientes pues está bien adaptado a las necesidades de la vida cotidiana y a la mayor parte de los problemas de interés científico.

No obstante, esta elección no se ha revelado totalmente adecuada a las necesidades de la ciencia, o al menos a las de la teoría científica; la escala temporal implícita en las leyes newtonianas del movimiento no se corresponde completamente con el tiempo estelar *standard*. Partiendo de nuestra concepción actual de las leyes de Newton se puede demostrar que la rotación de la tierra sobre sí misma va frenándose lentamente por efectos del frotamiento de las mareas y que, por consiguiente, existe una disminución gradual de la velocidad en el movimiento aparente de las estrellas. Así pues, se hacía necesario ajustar las leyes o el movimiento

estelar de referencia, al mismo tiempo que consideraciones de comodidad científica sugerían la búsqueda de un nuevo patrón de medida. Señalar la inadecuación teórica del antiguo *standard* carece de significado práctico, pero su gran importancia científica ha lanzado a físicos y astrónomos a la renovada búsqueda, plenamente activa en nuestros días, de un reloj que se adapte con mayor precisión que la propia máquina celeste a la escala de tiempos de la teoría científica.

2. La precesión de los equinoccios

Hemos introducido una segunda simplificación técnica en nuestro estudio al dejar de lado la precesión de los equinoccios. Esta precesión es el efecto, brevemente mencionado en el capítulo 1, que resulta del lento movimiento del polo celeste a través de las estrellas. Si sólo estamos interesados en las observaciones a simple vista que puedan efectuarse durante un lapso temporal a escala de la vida humana, nuestra simplificación habría sido perfectamente legítima, pues las observaciones a simple vista sólo pueden mostrarnos los efectos de la simplificación propuesta en caso de que medien entre ellas grandes intervalos de tiempo. No obstante, observaciones efectuadas, por ejemplo, con dos siglos de separación muestran que, si bien las estrellas conservan sus posiciones relativas, el polo celeste a cuyo alrededor se mueven se desplaza con respecto a ellas alrededor de 0,5° cada siglo. Observaciones repetidas a lo largo de períodos mucho más largos ponen al descubierto la estructura de este movimiento de precesión. A medida que pasan los siglos, el polo celeste se desplaza a través de las estrellas siguiendo un círculo y empleando un total de 26.000 años para completarlo. El centro de este círculo es el polo de la eclíptica, es decir, el punto de intersección de la esfera celeste con un eje perpendicular al plano de la eclíptica, y su radio es de 23° y medio, idéntico valor al del ángulo con que el ecuador celeste interseca la eclíptica sobre la esfera de las estrellas (figura 54*a*).

Parece ser que la primera referencia concreta al movimiento de precesión fue efectuada por el astrónomo helenístico Hiparco en el siglo II antes de nuestra era. Aunque poco conocido en un principio, este fenómeno fue estudiado en épocas posteriores por muchos astrónomos, entre ellos Ptolomeo. La mayor parte de los sucesores musulmanes de Ptolomeo describieron bajo una u otra forma la precesión de los equinoccios, consiguiendo dar una explicación física a la misma mediante la adición de una novena esfera al sistema antiguo. Su explicación más generalizada se indica en el diagrama de la figura 54*b*, donde sólo aparecen las tres esferas exteriores del sistema; *N* y *S* son los polos norte y sur celestes, y la esfera exterior gira en dirección oeste alrededor de los mismos completando una revolución cada 23 horas y 56 minutos, el mismo tiempo que empleaba la esfera de las estrellas en el sistema antiguo. La esfera inmediatamente inferior es la que transporta las estrellas, y se halla acoplada a la esfera externa mediante un eje que pasa por los polos de la eclíptica sobre la esfera de las estrellas y por dos puntos situados a una distancia de 23° y medio de los polos celestes. Esta nueva esfera de las estrellas se ve arrastrada por el movimiento cotidiano de la esfera exterior, lo que permite explicar las trayectorias diarias de las estrellas. Además, se halla animada por un lento y autónomo movimiento de rotación cuyo período es de 26.000 años, movimiento responsable del progresivo cambio de las posiciones relativas entre las estrellas y los polos celestes. La tercera esfera, la situada en el interior, es la de Saturno, y posee el espesor adecuado para albergar los componentes epicíclicos del movimiento de dicho planeta. Esta última esfera se ensambla con la estelar por medio de un eje que pasa por los polos de la eclíptica, lo que le permite dar cuenta del movimiento circular medio de Saturno a través de las estrellas.

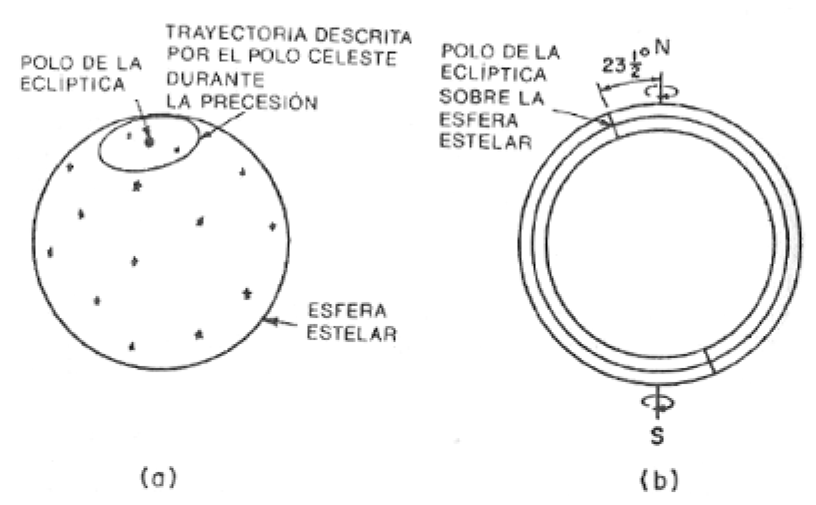


FIGURA 54. — La precesión de los equinoccios. El diagrama (*a*) representa el circulo sobre la esfera celeste recorrido por el polo celeste cada 26.000 años. El centro de este círculo es el polo de la eclíptica, y todos sus puntos están situados a 23 ½° de dicho centro. El diagrama (*b*) nos muestra la explicación dada por los árabes al fenómeno de la precesión mediante la introducción de una novena esfera, la exterior. Esta esfera completa una revolución cada 23 horas 56 minutos, es decir, en el mismo período de tiempo empleado por la esfera estelar para completar la suya en los sistemas con ocho esferas. La octava esfera, sobre la que se hallan situadas las estrellas, gira alrededor de sus polos completando una revolución cada 26.000 años, con lo que modifica de forma lenta y continuada la posición relativa del polo celeste. Dentro de la octava esfera aparecen las restantes esferas planetarias en el mismo orden que en los primitivos sistemas ptolemaicos. La esfera interior del presente diagrama es la correspondiente a Saturno.

Explicar la precesión mediante la inclusión de una novena esfera era, a un mismo tiempo, algo simple y natural en el contexto del pensamiento astronómico antiguo y medieval. De hecho, es fácilmente comparable con la explicación copernicana según la cual un movimiento cónico gradual del eje terrestre con una periodicidad de 26.000 años le dirige sucesivamente hacia todos los puntos de un círculo de 23 ½° de radio centrado en el polo de la eclíptica. Hasta que Newton explicó la precesión como una consecuencia física de la atracción gravitacional de la luna sobre la protuberancia ecuatorial de la tierra, tanto los astrónomos copernicanos como los ptolemaicos necesitaron introducir un movimiento suplementario y físicamente superfluo para dar cuenta de la misma. En realidad, el propio Copérnico no necesitó introducir un movimiento suplementario para explicar la precesión, pues ya había introducido otro con fines distintos. Copérnico empleaba un movimiento cónico anual para mantener el eje de la

tierra paralelo a sí mismo a lo largo de todo al año (figura 31*b*); podía, pues, explicar la precesión atribuyendo a dicho movimiento cónico un período ligeramente inferior al año. No obstante, los sucesores de Copérnico, que creían que un simple movimiento orbital podría mantener el eje terrestre perpetuamente paralelo a sí mismo, sí necesitaron de un movimiento cónico adicional, con un período de 26.000 años, para explicar los cambios posicionales del polo celeste. Así pues, la precesión no desempeñó papel alguno en la transición de un universo geocéntrico a un universo heliocéntrico.

Sin embargo, desde el punto de vista histórico, el problema de la precesión ejerció una función nada despreciable en el advenimiento de la revolución copernicana al contribuir a presentar como monstruosa la astronomía de Ptolomeo. Las consecuencias observacionales de la precesión son sumamente débiles, aun cuando las observaciones abarquen varios siglos, con lo que un ligero error en los datos produce un cambio radical en la descripción global del fenómeno. Tanto Hiparco como Ptolomeo habían descrito la precesión de forma cualitativamente equivalente a la representada en la figura 54, pero muchos de sus contemporáneos negaron por completo la existencia de este efecto o le dieron una descripción radicalmente distinta. En particular, entre los musulmanes se dieron numerosas descripciones divergentes de la precesión. Todas ellas le asignaban proporciones distintas y, de hecho, fueron muchos los astrónomos que creyeron en la variabilidad de sus efectos con el tiempo. Por otro lado, existía una importante escuela que creía que incluso la dirección de la precesión variaba de forma periódica, este último fenómeno era conocido bajo el nombre de trepidación. Debió esperarse a las cuidadosas observaciones de Tycho Brahe para que los astrónomos pudieran reconocer de nuevo la auténtica simplicidad del fenómeno. El propio Copérnico no hizo progresar en lo más mínimo la situación de este problema, añadiendo círculos adicionales a su sistema para explicar el gradual cambio en la velocidad de precesión y otros inexistentes fenómenos. Pero aunque no aportara ningún elemento nuevo a la explicación de la precesión dada por los astrónomos antiguos y medievales,

se intereso profundamente por esta cuestión, hecho que impulsó notablemente la reforma astronómica. En la época de Copérnico, el encontrar una explicación satisfactoria de la precesión era el requisito previo para resolver el más acuciante problema que tenía planteado la astronomía práctica: la reforma del calendario juliano.

Volvamos de nuevo a la figura 54 para descubrir el efecto de la precisión sobre la elaboración de calendarios. Tal como nos muestra el diagrama, la posición de la eclíptica sobre la esfera de las estrellas está fijada de una vez por todas. Pero, si bien los cambios de posición de los polos celestes no tienen efecto alguno sobre la eclíptica, modifican, por el contrario, la posición del ecuador celeste y, por consiguiente, la de los equinoccios, puntos en los que se cortan aquél y la eclíptica. Durante el período precesional, que es de 26.000 años, cada equinoccio se desplaza lenta y regularmente a lo largo de la eclíptica a razón de alrededor de 1° y medio cada siglo. Por consiguiente, el tiempo que emplea el sol para completar su recorrido a lo largo de la eclíptica (el llamado año sideral o sidéreo) no es el mismo que el que necesita para trasladarse, sobre la eclíptica, de un equinoccio de primavera al siguiente equinoccio de primavera (año trópico). Este último, que es unos 20 minutos más corto que el año sidéreo, es mucho más difícil de medir, pues refiere el movimiento del sol no a una estrella fija, sino a un punto imaginario y móvil. No obstante, el año trópico es el año de las estaciones, y éste es el que debe medirse con toda exactitud para poder establecer un calendario preciso a largo plazo. Fue pues el interés de Copérnico por el calendario el que le llevó a emprender un serio estudio de la precesión, y de ahí su profundo conocimiento sobre este aspecto de la astronomía en que tanto discrepaban todos los astrónomos ptolemaicos. Este problema de la precesión yace bajo la observación copernicana de que “es tal la inseguridad de los matemáticos […] que no pueden deducir ni observar la duración exacta del año estacional” (p. 149), y, a partir de ahí, es cuando Copérnico pasa a enumerar los motivos que le llevan a innovar la astronomía.

3. Las fases de la luna y los eclipses

Puesto que la explicación dada por los antiguos a las fases de la luna es idéntica a la de los modernos, este fenómeno no intervino para nada en la revolución copernicana, razón por la que pudimos omitirlo en los primeros capítulos del presente texto. Sin embargo, las fases de la luna tienen un papel de primera fila en las mediciones antiguas de las dimensiones del universo, y estas mediciones, como ya hemos indicado en varias partes, contribuyeron a hacer concreto y real el antiguo universo de las dos esferas tanto para el científico como para el profano. Por otro lado, las explicaciones dadas por los antiguos a las fases lunares y a los eclipses constituyen ilustraciones adicionales de gran importancia para constatar lo adecuada, desde el punto de vista científico, que era su visión global del mundo.

Esta explicación era perfectamente conocida en la Grecia del siglo IV antes de nuestra era, aunque quizá su origen se remonte a una época considerablemente anterior. Con la aceptación del universo de las dos esferas se imponía la hipótesis más amplia y bastante menos documentada de que todos los astros errantes del cielo también eran esferas. Esta hipótesis derivaba en parte de la analogía establecida entre las formas esféricas del cielo y la tierra, y, en parte, de la idea de la perfección implícita en la forma esférica y, por consiguiente, su completa adecuación a la perfección de los cielos. Una prueba más directa, aunque imperfecta, es la que aportaban las secciones rectas observadas del sol y de la luna. En el supuesto de que la luna sea esférica, un sol situado a gran distancia sólo puede iluminar la mitad de su superficie (figura 55*a*), y la fracción de este hemisferio iluminado visible para un observador terrestre variará necesariamente con su posición. Por consiguiente, la porción de superficie lunar visible para un observador terrestre dependerá de las posiciones relativas del sol, la luna y la tierra.

En la figura 55*b* se muestran cuatro posiciones *relativas* del sol y de la luna en cuatro períodos igualmente espaciados del mes lunar, donde las órbitas de la luna y el sol en el plano de la eclíptica tienen como centro la

tierra. (Puesto que en las discusiones sobre las fases de la luna sólo tienen importancia las posiciones relativas, el diagrama puede ser adaptado fácilmente a un universo heliocéntrico.) Si mantenemos la tierra inmóvil, una rotación hacia el oeste del resto del diagrama explica el movimiento diurno del sol y de la luna, de modo que un observador situado en *a* ve el sol a punto de ponerse y otro situado en *b* lo ve a punto de levantarse. Los únicos movimientos con respecto al esquema son los movimientos orbitales del sol y de la luna en dirección este. Cuando la luna está en la posición 1 del diagrama se levanta con el sol, pero puesto que es su hemisferio no iluminado el que mira hacia nosotros, se hace difícilmente visible para un observador terrestre. Ésta es la posición de luna nueva. Poco más de una semana después, el rápido movimiento orbital de la luna la ha llevado 90° hacia el este del sol, cuyo movimiento es mucho más lento, y aparece con respecto a éste en la posición 2. Ahora la luna se levanta al mediodía, y en el momento de ponerse el sol está casi en su cénit; desde la tierra sólo es visible con claridad la mitad del disco lunar; es la posición denominada de cuarto creciente. Transcurrida otra semana o poco más, la luna está llena y se levanta al ponerse el sol (posición 3). El cuarto menguante corresponde a la posición 4; la luna se levanta ahora a medianoche, y al salir el sol casi ha alcanzado su cénit.

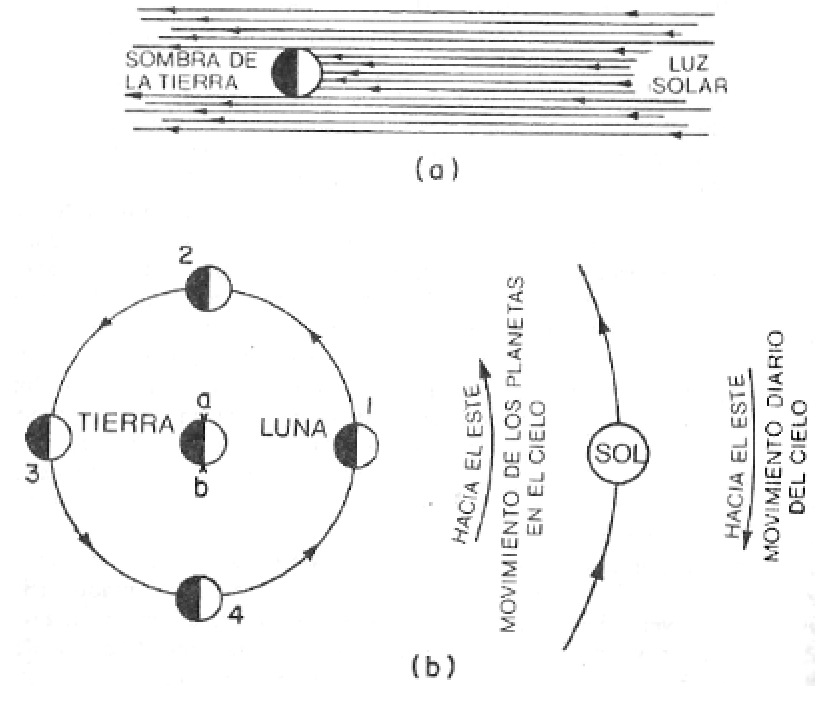


FIGURA 55. — Antigua (y moderna) explicación de las fases de la luna. El diagrama (*a*) nos indica que los rayos del sol sólo iluminan la mitad de la superficie de una esfera. El diagrama (*b*) muestra la porción de dicho hemisferio iluminado visible para un observador terrestre en diferentes posiciones *relativas* del sol, la tierra y la luna. La posición 1 corresponde a la luna nueva; la posición 2, a la luna creciente; la posición 3, a la luna llena; la posición 4, a la luna menguante.

El esquema empleado para interpretar las fases de la luna también puede servir para hacer lo propio con los eclipses. Cuando la luna pasa de la posición 2 a la posición 4, puede darse el caso de que atraviese la sombra de la tierra, con lo que queda privada de la luz solar y eclipsada. Si la luna permaneciera siempre sobre la eclíptica, se vería eclipsada cada vez que alcanzara la posición 3, pero, dada su constante oscilación a norte y sur de la misma, rara es la vez que la luna llena, la tierra y el sol se encuentran alineados. Para que se produzca un eclipse de luna es necesario que la luna llena circule muy cerca de la eclíptica, lo que sólo puede darse dos veces al año, aunque pocas son las ocasiones en que llega a producirse tal periodicidad. Los eclipses de sol se producen siempre que la luna, en la posición 1, proyecte su sombra sobre la tierra, situación que se da como mínimo dos veces por año. Sin embargo, es muy difícil observar eclipses de sol desde la tierra, pues la sombra que proyecta la luna sobre nuestro planeta es muy pequeña y el observador debe hallarse dentro de la misma

para poder ver el eclipse solar. Por otro lado, muy pocas son las veces que la luna tapa algo más que una pequeña fracción del disco solar. Así pues, lo más probable para cualquier observador es que vea poquísimos eclipses parciales de sol y que jamás tenga la oportunidad de contemplar un eclipse total. Un fenómeno como éste será para él raro, impresionante y, en algunos casos, incluso aterrador.

4. Las antiguas mediciones del universo

Una de las aplicaciones técnicas más interesantes de la astronomía antigua era su colaboración en la determinación de tamaños y distancias cosmológicas que podían ser medidos de forma directa; es decir, con la ayuda de los instrumentos ordinarios del agrimensor. Tales mediciones de distancias ilustran de forma mucho más directa que la mayor parte de sus restantes aplicaciones la fecundidad de la antigua visión del universo, ya que las operaciones matemáticas de que dependen pierden todo sentido físico a menos de que ciertos elementos esenciales del esquema conceptual empleado sean verdaderos. Por ejemplo, el que la tierra sea un disco o una esfera no influye para nada en el movimiento observado de las estrellas, pues en ambos casos parecerá que se desplazan a lo largo de círculos diarios y las técnicas que permiten describir este movimiento aparente seguirán siendo útiles con independencia de sus bases conceptuales. Pero sólo en el supuesto de que la tierra sea realmente una esfera podrá afirmarse que tiene una circunferencia susceptible de ser determinada a partir de las observaciones del cielo que acabamos de discutir.

La primera referencia a mediciones de la circunferencia terrestre aparece en las obras de Aristóteles, si bien es muy probable que estas mediciones se hubieran llevado a cabo a mediados del siglo IV antes de nuestra era. Sea como fuere, de estas primeras mediciones sólo conocemos sus resultados, no los métodos empleados para llevarlas a cabo. La primera medición de que poseemos información relativamente completa, aunque de segunda mano, es la debida a Eratóstenes, el conservador de la gran

colección de manuscritos recogida en la biblioteca de Alejandría durante el siglo III antes de nuestra era. Eratóstenes midió el ángulo α (figura 56) que formaban los rayos solares del mediodía con un gnomon vertical situado en Alejandría, *A*, en un día en que el sol a esta hora se encontraba en su cénit y exactamente por encima de Siena, *S*, otra ciudad de Egipto situada a 5.000 estadios al sur de Alejandría. Eratóstenes encontró que dicho ángulo era una quincuagésima parte de la circunferencia, es decir, de 7° 12'. Considerando que todos los rayos procedentes del sol llegan a la tierra paralelamente debido a su enorme distancia de nosotros, el ángulo α, que es la distancia angular del sol al cénit en Alejandría, es igual al ángulo *AOS* subtendido por *A* y *S* en el centro *O* de la tierra. Puesto que este ángulo es igual a una quincuagésima parte de circunferencia, la distancia entre Alejandría y Siena debe ser igual a una quincuagésima parte de la circunferencia terrestre. Así pues, la circunferencia total de nuestro planeta será 50 veces la distancia entre Alejandría y Siena, es decir, 50 × 5.000 = 250.000 estadios. La mayor parte de los eruditos modernos creen que la cifra de Eratóstenes es alrededor de un 5% inferior al resultado que nos proporcionan las actuales mediciones (40.000 kilómetros en números redondos), pero por desgracia es imposible estar seguro sobre este punto. La longitud del "estadio", unidad empleada por Eratóstenes, es desconocida, y no es posible servirnos de la distancia entre Alejandría y Siena para definir dicha unidad, pues tanto ésta como la proporción utilizadas en el cálculo han sido claramente "redondeadas" para hacer más clara la exposición.

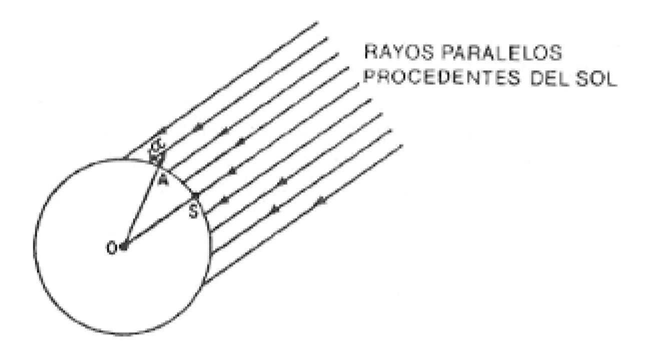


FIGURA 56. — Medición de la circunferencia terrestre efectuada por Eratóstenes. Si *S* es exactamente el sur de *A* sobre la circunferencia terrestre, la proporcionalidad existente entre la distancia *AS* y la circunferencia terrestre es la misma que la que hay entre el ángulo α y 360°.

Un segundo grupo de mediciones fue ejecutado durante el siglo III antes de nuestra era por Aristarco de Samos, en la actualidad más conocido como precursor del sistema copernicano. Aristarco estimó las dimensiones del sol y la luna, así como sus respectivas distancias a la tierra, en función del ángulo *LTS* formado por los segmentos que unen la tierra con los centros del sol y de la luna cuando se halla exactamente medio llena (figura 57).

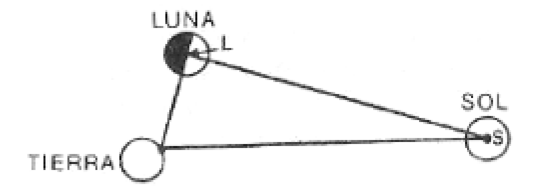


FIGURA 57. — Medición efectuada por Aristarco de las distancias relativas de la tierra y la luna al sol. Cuando la luna está exactamente en dicotomía, el ángulo *TLS* debe ser igual a 90°. En consecuencia, la medición del ángulo *LTS* determinará la relación entre *TL* y *TS*, es decir, la relación entre las distancias tierra-luna y tierra-sol.

Puesto que la luna sólo puede estar en dicotomía si el ángulo *TLS* es recto, el valor del ángulo *LTS* determina por completo las dimensiones del triángulo rectángulo con vértices en la tierra, el sol y la luna. Las mediciones de Aristarco daban un valor de 87° para el ángulo *LTS*, lo que correspondía a un triángulo en el que *TS*:*TL*::19:1. En consecuencia, indicó que el sol estaba 19 veces más lejos de la tierra que la luna, y que puesto que tanto uno como otra subtendían el mismo ángulo desde la tierra (figura 58), sus tamaños también estaban en idéntica proporción.

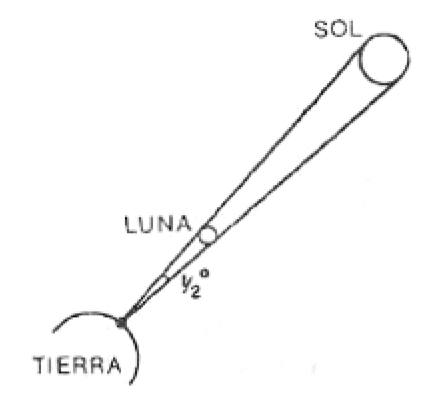


FIGURA 58. — El sol y la luna son vistos bajo el mismo ángulo desde la tierra. El mayor tamaño del sol viene compensado por su mayor distancia a la tierra.

Modernas mediciones efectuadas con técnicas muy diferentes y con la ayuda de telescopios muestran que la relación aceptada por Aristarco era excesivamente pequeña; la relación *TS:TL* es casi de 400:1, no de 19:1 como había supuesto el astrónomo griego. Esta discrepancia procede de la medición del ángulo *LTS*. En la práctica es sumamente difícil determinar con precisión los centros del sol y la luna; además, también lo es precisar cuándo la luna está *exactamente* medio llena. Teniendo en cuenta estas dificultades, un error de 1° en la determinación de *LTS* no es demasiado grande, y el valor dado por Aristarco presenta una discrepancia aun por debajo de este límite de tolerancia; el ángulo debía ser de 87° 51', en lugar de los 87° tomados por Aristarco. Parece ser que éste escogió el ángulo más pequeño compatible con sus inciertas observaciones con el fin de hacer más verosímil la relación resultante. Sus sucesores deben haberse sentido inspirados por similares consideraciones, pues las diferentes estimaciones de las distancias relativas al sol y la luna efectuadas durante la antigüedad y la Edad Media siguieron siendo demasiado pequeñas.

Las mediciones precedentes sólo indican las relaciones entre distancias astronómicas, aunque gracias a un razonamiento en extremo ingenioso, Aristarco consiguió convertirlas en distancias absolutas; es decir, pudo determinar en estadios los diámetros del sol y de la luna y sus respectivas distancias a la tierra. Sus resultados fueron deducidos de las observaciones de un eclipse de luna de máxima duración, un eclipse en el que la luna está de lleno sobre la eclíptica y, por consiguiente, pasa por el mismo centro del cono de sombra de la tierra. Primero, midió el tiempo transcurrido desde que el borde de la luna entra en la sombra y el instante en que queda completamente oscurecida. Comparando este tiempo con el tiempo total en que la luna permanece oscurecida por completo, descubrió que el período de oscuridad total era aproximadamente igual al requerido por la luna para entrar en la sombra de la tierra. En consecuencia sacó la conclusión de que la anchura de la sombra de la tierra en la región en que es atravesada por la luna equivale casi al doble del diámetro lunar (figura 59).

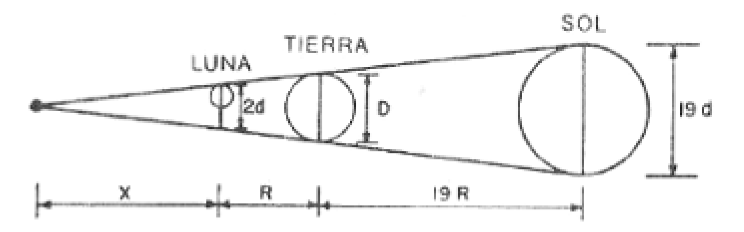


FIGURA 59. — Construcción de Aristarco con el objeto de calcular las distancias absolutas de nuestro planeta a la luna y al sol partiendo de los elementos aportados por observaciones efectuadas durante un eclipse de luna.

La figura 59 muestra la configuración astronómica analizada por Aristarco. En el diagrama la luna aparece en el mismo instante en que acaba de penetrar por completo en el cono de sombra de la tierra. El diámetro de la luna es d (una de las incógnitas), con lo que el diámetro de la sombra de la tierra proyectada sobre la luna es $2d$; el diámetro de la tierra es D (conocido en estadios a partir de la medición de la circunferencia terrestre efectuada por Eratóstenes); la distancia de la luna a la tierra es R (otra de las incógnitas a determinar). Finalmente, el diámetro del sol y su distancia a la tierra eran 19 veces más grandes que los respectivos valores de la luna, es decir, el diámetro del disco solar es precisamente $19d$ y la distancia del sol a la tierra $19R$. Así pues, el problema de Aristarco, y el nuestro, es determinar d y R, las distancias desconocidas, en función del diámetro D de la tierra, cuyo valor en estadios ha sido previamente determinado.

Se observa de inmediato en el esquema la existencia de tres triángulos semejantes cuyas bases tienen por longitudes $2d$, D y $19d$, y cuyas alturas son, respectivamente, x (desconocida), $x + R$ y $x + 20R$. (En realidad, las bases de los tres triángulos son ligeramente más cortas que los diámetros a los que las hemos equiparado, pero si los triángulos son, como éste es el caso, muy agudos, la discrepancia señalada es demasiado pequeña para afectar al resultado.) La razón entre la altura y la base debe ser la misma para los triángulos pequeño y grande, es decir,

$$\frac{x}{2d} = \frac{x + 20R}{19d}\,.$$

Multiplicando ambos miembros de la ecuación por $38d$, obtenemos

$$19x = 2x + 40R.$$

o lo que es lo mismo,

$$x = \frac{40R}{17}\ .$$

Dicho en otros términos, la sombra de la tierra se extiende más allá de la luna en una distancia igual a unas 2,3 veces la que existe entre la tierra y la luna.

Comparando el triángulo pequeño con el mediano, se obtiene una nueva ecuación en la que también puede ser despejada *d*. Como en el caso anterior, basándonos en las leyes de semejanza de triángulos,

$$\frac{x}{2d} = \frac{x + R}{D}\ .$$

Sustituyendo *x* por 40*R*/17 y multiplicando ambos lados de la igualdad por 17/*R*, resulta

$$\frac{20}{d} = \frac{40 + 17}{D}\ .$$

De esta última ecuación se deduce que $d = 20D/57 = 0{,}35\ D$, es decir, que el diámetro de la luna es un poco mayor que un tercio del diámetro terrestre; puesto que el diámetro del sol es 19 veces el de la luna, se concluye que aquél debe ser alrededor de unas 6,6 veces el diámetro terrestre.

Puesto que el diámetro *D* de la tierra es conocido, las dimensiones reales del sol y de la luna quedan perfectamente establecidas por los anteriores cálculos. Sus respectivas distancias a la tierra pueden obtenerse mediante un pequeño cálculo adicional. Puesto que tanto el sol como la luna se ven desde la tierra bajo un ángulo de 30', uno y otra pueden ser colocados 720 veces sobre una circunferencia completa (360°) centrada en nuestro planeta. Así pues, la distancia de la tierra a la luna debe ser igual al radio de un círculo cuya circunferencia es igual a 720 veces el diámetro de

la luna, que ya hemos determinado, y la distancia de la tierra al sol será justamente 19 veces más grande. Puesto que la longitud de una circunferencia es igual a 2 veces su radio, la distancia de la tierra a la luna debe ser algo más de 40 veces el diámetro de la tierra, mientras que la distancia entre la tierra y el sol será de alrededor de 764 diámetros terrestres.

Los métodos empleados en los anteriores cálculos son de una gran brillantez, característicos de las más altas cimas de la ciencia griega, pero to dos sus resultados numéricos, muy en particular los concernientes al sol, son inexactos en razón del error inicial cometido al determinar la separación angular del sol y de la luna en su estado de luna medio llena. Las mediciones modernas indican que el diámetro de la luna es algo mayor que un cuarto del terrestre y que su distancia a nuestro planeta es de alrededor de unos 30 diámetros terrestres; ambos valores no se alejan demasiado de los computados por Aristarco. Sin embargo, en la actualidad se considera que el diámetro solar es casi 110 veces el de la tierra y que la distancia del sol a nuestro planeta es aproximadamente de unos 12.000 diámetros terrestres, estimaciones ambas muy superiores a las supuestas por Aristarco. A pesar de las diversas correcciones de las mediciones de Aristarco efectuadas en la antigüedad y de que muy a menudo se reconociera la posibilidad de un error sensible en la determinación de la distancia al sol, lo cierto es que todas las estimaciones de las dimensiones cosmológicas antiguas y medievales quedaron muy por debajo de sus auténticos valores.

Puesto que los métodos usados por Aristarco para determinar las dimensiones y distancias no dependen de las posiciones relativas de la tierra, la luna y el sol, pueden aplicarse con idénticas precisión o imprecisión a los universos ptolemaico y copernicano. En consecuencia, las antiguas determinaciones de las dimensiones del universo no pudieron desempeñar ninguna función directa en la revolución copernicana; no obstante, a través de varios caminos indirectos, ayudaron a reforzar el sistema ptolemaico. De un lado la posibilidad de efectuar mediciones astronómicas ilustraba la fecundidad operativa del universo aristotélico-ptolemaico. Además, los resultados de dichas mediciones ayudaron a

proporcionar visos de realidad a la antigua cosmología incrementando el carácter concreto de su estructura. Finalmente, y éste es el aspecto más importante, la medición de la distancia a la luna proporcionó a los astrónomos una especie de patrón ampliamente utilizado a lo largo de toda la Edad Media para determinar de forma indirecta las dimensiones de todo el universo.

Ya hemos indicado en el capítulo 3 que los cosmólogos medievales acostumbraban a suponer que toda esfera cristalina tenía suficiente espesor como para contener el epiciclo de su planeta y que tales esferas encajaban unas en otras llenando la totalidad del espacio. A partir de estas hipótesis matemáticas, los astrónomos consiguieron determinar las dimensiones y los espesores relativos de todas y cada una de las esferas. Acto seguido, y aplicando el método empleado por Aristarco para determinar la distancia a la esfera de la luna, dichas dimensiones relativas fueron convertidas en diámetros terrestres, estadios o millas. Recuérdese la inclusión de un típico conjunto de dimensiones cosmológicas obtenidas por este sistema en nuestra precedente discusión sobre la cuestión (capítulo 3), clara muestra del detalle con que fue estudiado y comprendido el universo por los científicos precopernicanos.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS

NOTA DEL TRADUCTOR

En la presente obra cabe distinguir con toda claridad dos tipos de referencias bibliográficas. Por un lado, las que se insertan como notas a pie de página; por otro, la bibliografía incluida al final del texto. Dos son también los criterios perfectamente diferenciados que se han seguido para uno y otro tipo de información en la actual edición castellana.

Se observará que prácticamente todas las citas bibliográficas incluidas en notas a pie de página corresponden a "clásicos". Razones de coherencia y uniformidad nos han inclinado a seguir un criterio de citación no por usual canónico. De lo contrario, al lado de poder incluir innúmeras referencias a, por ejemplo, ediciones castellanas de los textos de Dante, Platón o Milton, hubieran quedado huérfanas de las mismas otros textos tan clásicos como los de Marsilio Ficino, Nicolás de Oresme o Newton. Además, con tal convenio también se ha evitado colocar una referencia a Aristóteles siguiendo una traducción al castellano junto a otra a Ficino siguiendo una traducción inglesa. Por otro lado, tal forma de proceder no ha acarreado pérdida de información alguna para todo aquel que desee consultar los textos originales, pues en la bibliografía de clausura se dan útiles indicaciones acerca de los mismos.

En cuanto a la bibliografía incluida por el autor en la edición original, los cambios introducidos son mínimos y secundarios, a saber: de una parte, se incluyen en la presente edición los datos bibliográficos sobre materiales en prensa o mimeografiados cuando vio la luz el original y se hace referencia a las últimas ediciones aparecidas de algunos de los textos recomendados; de otra, cuanto aparece encerrado entre corchetes son pequeñas observaciones ajenas al propio Kuhn e informaciones bibliográficas de utilidad para el lector de la presente edición castellana.

D. B. F.

Estas notas sirven a la vez como indicación de cuáles son mis mayores deudas para con otros estudios y como adecuado marco de referencia para introducirse en el vasto laberinto de la literatura consagrada a la historia de la astronomía anterior al 1700 y a campos con ella relacionadas. Siempre que ha sido posible, he circunscrito mis indicaciones a obras publicadas en inglés. Con escasas excepciones, los artículos, monografías y estudios en otras lenguas sólo los he citado cuando han contribuido de forma esencial a mi propio enfoque de la revolución copernicana (tal como sucede con una serie de recientes estudios) o han sido omitidos entre las principales fuentes bibliográficas indicadas en las notas del texto.

TEXTOS GENERALES

Se encontrarán detalladas bibliografías para varios de los aspectos que abarca nuestro estudio en M. R. Cohen y I. E. Drabkin, *A source book of Greek science*, Nueva York, 1948; E. J. Dijksterhuis, *De Mechanisering van het wereldbeeld*, Amsterdam, 1950 [existe versión inglesa: *The mechanisation of the world picture*, Clarendon Press, Oxford, 1961]; F. Russo, *Histoire des sciences et des techniques: Bibliographie*, París, 1954 [existe una segunda edición reestructurada y aumentada bajo el título *Éléments de bibliographie de l'histoire des sciences et des techniques*, Hermann, París, 1969]; y George Sarton, *A guide to the history of Science*, Waltham, Mass., 1952. Bibliografías exhaustivas para varios temas de importancia aparecen en George Sarton, *Introduction to the history of*

science, 3 tomos en 5 vols., Baltimore, 1927-1948 [el contenido de esta obra sólo abarca desde los orígenes del pensamiento científico hasta el año 1400 de nuestra era], y en las bibliografías anuales que aparecen en la revista *Isis*. Otros muchos de los libros que se citarán a continuación contienen valiosísima información bibliográfica. Son especialmente útiles los recientes trabajos de A. C. Crombie, *Augustine to Galileo*, Cambridge, Mass., 1952 [existe versión castellana: *Historia de la ciencia: De San Agustín a Galileo*, trad. de José Bernia, 2 vols., Alianza Editorial, Madrid, 1974], y de A. R. Hall, *The scientific revolution, 1500-1800*, Londres, 1954.

Todas las historias generales de la ciencia discuten el periodo y muchos de los problemas abarcados por el presente texto, pero tan sólo ha tenido una particular influencia sobre su estructura Herbert Butterfield, *The origins of modern science, 1300-1800*, Londres, 1949 [existe versión castellana: *Los orígenes de la ciencia moderna*, trad, de L. Castro, Taurus, Madrid, 1971[2]]. Marshall Clagett, *Greek science in antiquity*, Nueva York, 1955, y A. R. Hall, *Scientific revolution*, ya citado, constituyen marcos de referencia sumamente útiles para sus respectivos periodos, aunque no pude disponer de uno ni de otro hasta que mi manuscrito ya estaba completamente elaborado en sus líneas substanciales. También constituye una fuente de gran valor E. J. Dijksterhuis, *Mechanisation*, citado.

Bertrand Russell, *A history of western philosophy*, Nueva York, 1945 [existen versiones catalana y castellana: *Historia social de la filosofía*, 2 vols., trad, de Jordi Solé-Tura, Edicions 62, Barcelona, 1967; *Historia de la filosofía occidental*, 2 vols., Espasa Calpe, Madrid, 1974[2]], y W. Windelband, *A history of philosophy*, trad. de J. H. Tufts, Nueva York, 1901, constituyen utilísimos textos de consulta para enmarcar los aspectos concernientes al desarrollo de la filosofía. J. L. E. Dreyer, *A history of astronomy from Thales to Kepler*, Nueva York, 1953[2]; Lynn Thorndike, *A history of magic and experimental science*, 6 vols., Nueva York, 1923-1941, y Sarton, *Introducción*, ya citado, han sido consultados tan a menudo para la elaboración de este libro que me limito a citarlos en aquellas partes en las que me ajusto por completo a las tesis en ellos expuestas. También he consultado bajo idéntico enfoque para algunos problemas particulares

Pierre Duhem, *Le Système du monde: Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, 10 vols., Paris, 1913-1917 (5 vols.), y 1954-1960 (5 vols.).

Capítulos 1 y 2

R. H. Baker, *Astronomy*, Nueva York, 1950[5], es una excelente fuente de información de astronomía técnica.

George Sarton, *A history of Science: Ancient Science through the golden age of Greece*, Cambridge, Mass., 1952 [existe versión castellana: *Historia de la ciencia. La ciencia antigua durante la edad de oro griega*, 2 vols., EUDEBA, Buenos Aires, 1965] contempla la astronomía egipcia, mesopotámica y helénica en el contexto de la ciencia y la cultura antiguas. O. Neugebauer, *The exact sciences in antiquity*, Princeton, 1952, proporciona una introducción mucho más detallada a la astronomía egipcia y babilónica, desde sus comienzos hasta el período helenístico, aunque la selección de materiales efectuada pueda confundir a algunos lectores acerca del importante papel desempeñado por la tradición astronómica helénica. Sir Thomas L. Heath, *Aristarchus of Samos*, Oxford, 1913, es la fuente estándar para la astronomía griega del siglo III antes de nuestra era y los capítulos VII-IX de J. L. E. Dreyer, *History*, citado antes, se dedican a la discusión de la astronomía griega desde Apolonio a Ptolomeo.

Una buena selección de antiguos escritos astronómicos puede hallarse en Sir Thomas L. Heath, *Greek astronomy*, Londres, 1932, y en M. R. Cohen y Y. E. Drabkin, *Source book*, ya citado. El *Almagesto* ptolemaico ha sido recientemente traducido al inglés por R. Catesby Taliaferro e incluido en la colección *Great books of the western world*, vol. XVI, Chicago, 1952. No obstante, todo estudio detallado y erudito sigue dependiendo de la edición estándar, *Syntaxis mathematica*, edición de J. L. Heiberg, 2 vols., Leipzig, 1898-1903.

En algunas de las fuentes citadas anteriormente aparece gran cantidad de información sobre los calendarios antiguos. Estudios mucho más

detallados son F. H. Colson, *The week*, Cambridge, Mass., 1926, y R. A. Parker, *The calendars of ancient Egypt*, Chicago, 1950. La función de Stonehenge como observatorio primitivo se halla discutida en Sir Norman Lockyer, *Stonehenge and other British stone monuments astronomically considered*, Londres, 1909[2], y en Jacquetta Hawkes, "Stonehenge", *Scientific American*, CLXXXVIII (junio 1953), pp. 25-31. Sobre el papel desempeñado por los cielos en el pensamiento cosmológico primitivo, véase Henri Frankfort y otros, *The intellectual adventure of ancient man*, Chicago, 1946, y Heinz Werner, *The comparative psychology of mental development*, ed. revisada, Chicago, 1948 [existe versión castellana: *Psicología comparada del desarrollo mental*, Paidós, Buenos Aires, 1965].

CAPÍTULO 3

Las principales fuentes para el presente capítulo son los escritos aristotélicos sobre ciencias físicas, en particular sus *Física*, *Metafísica*, *Del cielo*, *Meteorología* y *De la generación y corrupción*. [Sin duda alguna, entre las ediciones más cuidadas y exactas que pueden consultarse en cualquier lengua moderna cabe señalar las versiones inglesas de The Loeb Classical Library y *The works of Aristotle translated into english*, edición de Sir William David Ross, 12 vols., Oxford, 1928-1952.] La traducción de la *Física* aristotélica, Oxford, 1934, efectuada por Sir W. D. Ross es particularmente útil, tanto por su precisión como por las notas criticas que la acompañan.

Los trabajos de John Burnet, *Early Greek philosophy*, Londres, 1920[3]; Theodor Gomperz, *Griechische denker: Eine geschichte der antiken philosophie*, 3 vols., Leipzig, 1922-1930[4] [existe versión castellana: *Pensadores griegos*, 3 vols., Librería del Plata, Buenos Aires, 1951-1952]; y Kathleen Freeman, *The pre-socratic philosophers*, Oxford, 1946, permiten situar el pensamiento de Aristóteles en el seno de la tradición establecida por sus predecesores. Sir W. D. Ross, *Aristotle*, Londres, 1937[3] [existe versión castellana: *Aristóteles*, trad. de Diego F. Pró, Sudamericana,

Buenos Aires, 1957]; y Werner Jaeger, *Aristotle: Fundamentals of the history of his development*, trad. de Richard Robinson, Oxford, 1934 [existe versión castellana: *Aristóteles*, trad. de J. Gaos, FCE, México, 1946], contienen importantes estudios bibliográficos sobre los mencionados trabajos de Aristóteles. F. M. Cornford, *The laws of motion in ancient thought*, Cambridge, 1931, se ocupa con gran penetración de varios de los problemas tratados en el presente capítulo.

Las evaluaciones post-ptolemaicas de las dimensiones cosmológicas a partir del principio de plenitud del universo han sido discutidas por Edward Rosen, “A full universe”, *Scientific Monthly*, LXIII (1946), pp. 213-217, y en los capítulos VIII y XI de J. L. E. Dreyer, *History* (citado antes en Textos generales). La prueba experimental de Pisa se analiza en Lane Cooper, *Aristotle, Galileo, and the leaning tower of Pisa*, Ithaca, 1935, trabajo que deberá complementarse con las discusiones acerca del desarrollo de las leyes galileanas que se citan en la bibliografía correspondiente a los capítulos 4 y 7. Las concepciones primitivas de espacio y movimiento se discuten en H. Werner, *Psicología comparada* (citado antes en Capítulo 1) y en los numerosos trabajos de Jean Piaget, en especial *La représentation du monde chez l’enfant*, París, 1926 [existe versión castellana: *La representación del mundo en el niño*, Espasa Calpe, Madrid, 1933], *La causalité physique chez l’enfant*, París, 1927 [existe versión castellana: *La causalidad física en el niño*, Espasa Calpe, Madrid, 1934) y *Les notions de mouvement et de vitesse chez l’enfant*, París, 1946.

CAPÍTULO 4

Los aspectos más sobresalientes de la transición desde la ciencia helénica a la helenística han sido esbozados en George Sarton, *Ancient science and modern civilization*, Lincoln, Neb., 1954 [existe versión castellana: *Ciencia antigua y civilización moderna*, FCE, México]. Un desarrollo mucho más detallado se hallará en la *Introducción* (citado antes en Textos generales) del mismo autor.

Henry Osborn Taylor, *The mediaeval mind*, 2 vols., Cambridge, Mass., 1925[4], discute el primitivo desprecio de los apologistas cristianos por la ciencia pagana y J. L. E. Dreyer, *History* (ya citado en Textos generales) proporciona un buen número de ejemplos astronómicos relevantes. Son importantes en este aspecto las fuentes primarias constituidas por San Agustín, *Confesiones*, en *Obras de San Agustín*, tomo II, edición crítica y anotada del P. Fr. Ángel Custodio Vega, O. S. A., BAC, Madrid, 1955[3], y *Enquiridión*, en *Obras de San Agustín*, tomo IV, versión, introducciones y notas de los PP. Fr. Victorino Capánaga, O. R. S. A., Fr. Teófilo Prieto, Fr. Andrés Centeno, Fr. Santos Santamaría y Fr. Herminio Rodríguez, O. S. A., BAC, Madrid, 1956[2].

Mi descripción de la reconciliación entre la cosmología aristotélica y la historia bíblica deriva de los *Commentaria* a los tratados físicos de Aristóteles y de la *Summa theologica* de Santo Tomás de Aquino, *Opera omnia*, 12 vols., Roma, 1882-1906 [por lo que hace referencia a los textos correspondientes a la *Summa theologica*, puede consultarse la edición de los mismos, generalmente bilingüe, efectuada por la BAC]. El resultado de tal integración queda de manifiesto en el *Convivio* y la *Commedia* de Dante [existen diversas versiones castellanas, pero la más asequible es *Obras completas de Dante*, trad, de Nicolás González Ruiz sobre la interpretación literaria de Giovanni M. Bertini, BAC, Madrid, 1956]. Los efectos de la metáfora cosmológica sobre el pensamiento medieval y renacentista han sido esbozados en Charles H. Grandgent, *Discourses on Dante*, Cambridge, Mass., 1924, y S. L. Bethell, *The cultural revolution of the seventeenth century*, Londres, 1951.

La astronomía arábiga y europea medieval se ve sometida a amplio estudio en J. L. E. Dreyer, *History*, P. Duhem, *Le système*, y G. Sarton, *Introducción* (todos ellos citados antes en Textos generales). También aborda el tema Lynn Thorndike, *Science and thought in the fifteenth century*, Nueva York, 1929, sosteniendo que los estudiosos anteriores han datado el surgimiento de una tradición astronómica europea erudita en época demasiado tardía. No obstante, al menos en cuanto se refiere al

problema de los planetas, creo que las tesis de Thorndike son escasamente convincentes.

A. C. Crombie, *De San Agustín a Galileo* (ya citado en Textos generales) constituye el mejor esbozo global de la ciencia medieval, tanto temático como bibliográfico. Mi propio enfoque también se halla en deuda con numerosos estudios específicos, en particular Carl Boyer, *The concepts of the calculus*, Wakefield, Mass., 1949[2]; Marshall Clagett, *Giovanni Marliani and late medieval physics*, Nueva York, 1941, y "Some general aspects of physics in the Middle Ages", *Isis*, XXXIX (1948), pp. 29-44; Alexandre Koyré, *Études galiléennes*, Paris, 1967[2]; Annaliese Maier, *Studien zur Naturphilosophie der Spätscholastik, 4 vols*., Roma, 1951-1955; y John Herman Randall, Jr., "The development of scientific method in the School of Padua", *Journal of the History of Ideas*, I (1940), pp. 177-206. Tanto Koyré como Randall proporcionan ilustraciones particularmente interesantes acerca de la transmisión de las ideas escolásticas a los fundadores de la ciencia moderna. Entre las fuentes originales para estudiar las teorías escolásticas del movimiento cabe destacar Thomas Bradwardine, *Tractatus de proportionibus*, edición y trad, de H. Lamar Crosby, Jr., Madison, Wis., 1955; Marshall Clagett, ed., *The science of mechanics in the Middle Ages*, Madison, Wis., 1959; Jean Buridan, *Quaestiones super libris quattuor de caelo et mundo*, edición de Ernest A. Moody, Mediaeval Academy of America, Cambridge, Mass., 1942; y Nicolás de Oresme, *Le livre du ciel et du monde*, edición de A. D. Menut y A. J. Denomy, en *Mediaeval Studies*, III-V, Toronto (1941-1943).

La interrelación entre ciencia y variaciones sociales, económicas e intelectuales durante el Renacimiento ha sido estudiada por John Herman Randall, Jr., *The making of the modern mind*, ed. revisada, Boston, 1940 [existe versión castellana: *La formación del pensamiento moderno*, Buenos Aires, 1952], y por Myron P. Gilmore, *The world of humanism*, 1453-1517, Nueva York, 1952. El neoplatonismo antiguo y renacentista ha sido discutido en Lynn Thorndike, *Magic and experimental science* (citado antes en Textos generales) y Arthur O. Lovejoy, *The great chain of being*, Cambridge, Mass., 1948 [existe versión castellana: *La historia de las ideas*,

Tipográfica Editora Argentina, Buenos Aires]. Henry Osborn Taylor, *Thought and expression in the sixteenth century*, 2 vols., Nueva York, 1920, incluye una descripción del platonismo renacentista. La actitud de Platón frente a las matemáticas es tratada por Sir Thomas L. Heath, *A history of Greek mathematics*, 2 vols., Oxford, 1921, y los efectos de tal actitud sobre la ciencia, en su forma neoplatónica, son discutidos desde diversos puntos de vista por Edwin Arthur Burtt, *The metaphysical foundations of modern physical science*, Nueva York, 1932 [existe versión castellana: *Los fundamentos metafísicos de la ciencia moderna. Ensayo histórico y critico*, trad, de Roberto Rojo, Sudamericana, Buenos Aires, 1960]; Alexandre Koyré, "Galileo and Plato", *Journal of the History of Ideas*, IV (1943), pp. 400-428 [este articulo ha sido traducido al francés por Georgette P. Vignaux y recogido en Alexandre Koyré, *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Gallimard, París, 1973]; y Edward W. Strong, *Procedures and metaphysics*, Berkeley, Calif., 1936. El último de los trabajos que acabamos de citar es el único que hace hincapié en el carácter místico y acientífico del pensamiento neoplatónico, pero quizá vaya demasiado lejos al sacar la conclusión de que un punto de vista tan sumamente irracional no ha podido desempeñar ningún efecto fructífero en la práctica científica. En relación con el neoplatonismo, véase también las obras relacionadas con Nicolás de Cusa y Giordano Bruno que se citan posteriormente en la bibliografía del capítulo 7. [Cabe citar en este aspecto un trabajo definitivo sobre el tema, donde se analiza la figura de Bruno en el seno de la tradición hermética y se ponen de manifiesto las estrechas vinculaciones entre los componentes neoplatónicos, cabalísticos y herméticos dentro de la obra bruniana. Se trata de Frances A. Yates, *Giordano Bruno and the hermetic tradition*, Routledge and Kegan Paul, Londres, 1964.]

CAPÍTULO 5

La vida y la obra de Copérnico han sido magníficamente descritas por Angus Armitage, *Copernicus, the founder of modern astronomy*, Londres,

1938, pero su estudio debe ser complementado con el mucho más completo trabajo de Ludwig Prowe, *Nicolaus Coppernicus*, 2 vols., Berlín, 1883-1884. Los trabajos menores de Copérnico y la *Narratio prima* de Rheticus han sido traducidos y acompañados de una excelente introducción y notas críticas por Edward Rosen, *Three copernican treatises*, Nueva York, 1939. La única traducción completa al inglés de la obra maestra de Copérnico es Nicolaus Copernicus, *On the revolutionibus of the heavenly spheres*, trad. de Charles Gleen Wallis, en *Great books of the western world*, vol. XVI, Chicago, 1952, pero todo aquel que quiera utilizar esta edición debe consultar primero la completísima crítica a la misma de O. Neugebauer aparecida en *Isis*, XLVI (1955), pp. 69-71. Alexandre Koyré ha efectuado una cuidada edición bilingüe latín-francés del Libro Primero del *De revolutionibus* acompañada de notas y de una tan penetrante como provocativa discusión introductoria en *Copernic, Des Révolutions des orbes célestes*, París, 1973[2]. La edición canónica del texto completo se debe a Maximilian Curtze, *Nicolai Copernici Thorunensis: De revolutionibus orbium caelestium libri VI*, Torún, 1873. Importantes aspectos de la astronomía copernicana aparecen discutidos en J. L. E. Dreyer, *History* (citado antes en Textos generales), y de su física y cosmología de Edgar Zilsel, “Copernicus and Mechanics”, *Journal of the History of Ideas*, I (1940), pp. 113-118.

Capítulo 6

Una notable cantidad de material útil sobre las reacciones frente a la astronomía copernicana durante los siglos XVI y XVII se recoge en Francis Johnson, *Astronomical thought in Renaissance England*, Baltimore, 1937; Grant McColley, “An early friend of the copernican theory: Gemma Frisius”, *Isis*, XXVI (1937), pp. 322-325; Dorothy Stimson, *The gradual acceptance of the copernican theory of the universe*, Nueva York, 1917; Lynn Thorndike, *Magic and experimental science* (ya citado en Textos generales), particularmente en el vol. V, cap. 18, y en el vol. VI, caps. 31 y

32; y Andrew D. White, *A history of the warfare of science with theology in Christendom*, 2 vols., Nueva York, 1896. El material recogido por Thorndike es el de mayor riqueza y el más equilibrado, aunque debe ser usado con cautela por que contiene algunos errores elementales de importancia en cuanto a las relaciones técnicas entre la astronomía copernicana y la ptolemaica (véase, por ejemplo, la frase que enlaza las pp. 424 y 425 en el vol. V).

El más completo y reciente estudio del conflicto entre Galileo y la Iglesia es el de Giorgio de Santillana, *The crime of Galileo*, Chicago, 1955 [existe versión castellana: *El crimen de Galileo*, Ediciones Antonio Zamora, Buenos Aires, 19621. No obstante, siguen manteniendo su utilidad algunos de los trabajos anteriores sobre el tema, en especial Karl von Gebler, *Galileo Galilei and the Roman Curia*, trad. de George Sturge, Londres, 1879; y James Brodrick, S. J., *The life and work of blessed Robert Francis Cardinal Bellarmine*, 2 vols., Londres, 1928.

Sobre Tycho Brahe, véase J. L. E. Dreyer, *Tycho Brahe*, Edimburgo, 1890, y Tycho Brahe, *Opera Omnia*, edición de J. L. E. Dreyer, 15 vols., Hauniae, 1913-1929. La tan a menudo subestimada popularidad del sistema ticónico ha sido convenientemente documentada por Grant McColley, “Nicolás Reymes and the fourth system of the world”, *Popular Astronomy*, XLVI (1938), pp. 25-31, y “The astronomy of Paradise Lost”, *Studies in Philology*, XXXIV (1937), pp. 209-247.

No existe en inglés ningún estudio adecuado de la vida y la obra de Kepler, pero Carola Baumgardt, *Johannes Kepler: Life and letters*, Nueva York, 1951, incluye algunas citas de los textos originales que son de suma utilidad. La obra estándar sobre el tema es Max Caspar, *Kepler*, trad. y edición de D. Hellman, Nueva York, 1952; y los principales trabajos de Kepler se hallan recogidos en *Gesammelte werke*, edición de Max Caspar, 12 vols., Munich, 1938-1955. R. H. Baker, *Astronomy* (citado antes en Capítulo 1) contiene un estudio técnico de las leyes de Kepler desde un punto de vista moderno. Se incluye una notable cantidad de información sobre el desarrollo técnico de los trabajos keplerianos en J. L. E. Dreyer, *History* (ya citado en Textos generales) y en A. Wolf, *A history of science,*

technology and philosophy in the XVI *and* XVII *centuries*, ed. revisada preparada por Douglas McKie, Londres, 1950. En la bibliografía correspondiente al capítulo 7 se citan otros importantes estudios sobre Kepler.

Las observaciones telescópicas de Galileo se discuten en muchos de los trabajos citados en líneas anteriores. Sin embargo, la mejor información puede extraerse directamente de dos de las obras galileanas, el *Siderius nuncius* [existe versión castellana: *El mensajero de los astros*, EUDEBA, Buenos Aires], y los *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* [entre cuyas ediciones modernas cabe destacar Galileo Galilei, *Opere*, edición de Ferdinando Flora, Milán, 1953, y Galileo Galilei, *Opere*, edición nacional italiana al cuidado de Antonio Favaro, vol. VII]. Indicaciones acerca del inmenso impacto del telescopio sobre la imaginación científica y popular se encontrarán en Marjorie Hope Nicolson, “A world in the moon”, *Smith College Studies in Modern Languages*, XVII, n.º 2, Northampton, Mass. (1936); Martha Ornstein, *The role of scientific societies in the seventeenth century*, Chicago, 1938; algunas selecciones de *The portable elizabethan reader*, edición de Hiram Haydn, Nueva York, 1946, y Edward Rosen, *The naming of the telescope*, Nueva York, 1947. La mayor parte de la obra de Galileo cae fuera de los limites del presente texto; no obstante, en las bibliografías citadas en los capítulos 4 y 7 se encontrarán referencias a algunos otros importantes estudios sobre el tema.

CAPÍTULO 7

Las ideas pre y postcopernicanas sobre la infinitud del universo se discuten en Francis R. Johnson y Sanford V. Larkey, “Thomas Digges, the copernican system, and the idea of the infinity of the universe”, *Huntington Library Bulletin*, V (abril 1934), pp. 69-117; Alexandre Koyré, “Le vide et l’espace infini au XIV siècle”, *Archives d’Histoire Doctrinale et Littéraire du Moyen Âge*, XXIV (1949), pp. 45-91; A. O. Lovejoy, *Great chain*

(citado antes en Capítulo 4); y Grant McColley, “Nicolas Copernicus and an infinite universe”, *Popular Astronomy*, XLIV (1936), pp. 525-533, y “The seventeenth-century doctrine of a plurality of worlds”, *Annals of Science*, I (1936), pp. 385-430. Los artículos de McColley son particularmente informativos, aunque exagera la nota en lo que se refiere a la creencia por parte del propio Copérnico en un universo infinito. El artículo de Johnson reproduce los pasajes más relevantes de la *Perfit description* de Digges. Otros textos originales de gran utilidad son Nicolás de Cusa, *De docta ignorantia*, trad. castellana, prólogo y notas de M. Fuentes Benot, Buenos Aires, 1957, y ciertos pasajes del *De ludo globi*, selección y trad. de Maurice de Gandillac en *Oeuvres choisies de Nicolas de Cues*, París, 1942. También se consultará con provecho Giordano Bruno, *Sobre el infinito universo y los mundos*, trad. de A. J. Capelleti, Aguilar, 1972.

A pesar de la abundancia y calidad de los trabajos sobre este tema, parece existir una importante laguna en nuestros conocimientos sobre la evolución de la idea de un universo copernicano infinito. Desde la muerte de Bruno, acaecida en 1600, hasta la publicación de los *Principes de philosophie* cartesianos en 1644, no tenemos noticia de que ningún copernicano de primera fila defendiera la idea de un universo infinito, al menos públicamente. No obstante, después de Descartes parece ser que ningún copernicano se manifestó en contra de tal concepción. Es comprensible este silencio durante la primera mitad del siglo XVII, pero no por ello deja de plantear un rompecabezas sobre el desarrollo y propagación de la creencia en un universo físicamente infinito.

Frederick A. Lange, *The history of materialism*, trad, de E. C. Thomas, Nueva York, 1950[3], y Kurd Lasswitz, *Geschichte der Atomistik*, 2 vols., Hamburgo, 1926[2], incluyen gran cantidad de información esencial sobre el desarrollo del atomismo desde la antigüedad clásica. El atomismo del siglo XVII ha sido estudiado en detalle por Marie Boas, “The establishment of the mechanical philosophy”, *Osiris*, X (1952), pp. 412-541, una monografía que también incluye una excelente y completa bibliografía sobre el tema. Entre los trabajos de importancia que contemplan el papel del atomismo en el desarrollo de la ciencia moderna se hallan Fulton H. Anderson, *The*

philosophy of Francis Bacon, Chicago, 1948; Marie Boas, “Boyle as a theoretical scientist”, *Isis*, XLI (1950), pp. 261-268; Thomas S. Kuhn, “Robert Boyle and structural chemistry in the seventeenth century”, *Isis*, XLIII (1952), pp. 12-36; y Paul Mouy, *Le développement de la physique cartésienne*, Paris, 1934. Importantes y representativos documentos originales para estudiar los dogmas centrales de esta tradición dentro del siglo XVII son René Descartes, *Les principes de la philosophie* y *Le monde ou le traite de la lumière*, incluidos respectivamente en los volúmenes IX y XI de las *Oeuvres de Descartes*, edición de Charles Adam y Paul Tannery, París, 1904 y 1909, y Robert Boyle, *Origin of qualities and forms*, en el vol. II de *The works*, edición de A. Millar, Londres, 1744.

Para estudiar los problemas planteados a los físicos terrestres por la teoría copernicana, véase Alexandre Koyré, *Études galiléennes*, París, 1967[2], “Galileo and the scientific revolution of the seventeenth century”, *Philosophical Review*, LII (1943), pp. 333-348 [este artículo, en versión francesa, ha sido recogido en Alexandre Koyré, *Études d’histoire de la pensée scientifique*, Gallimard, París, 1973], y, en especial, “A documentary history of the problem of fall from Kepler to Newton”, *Transactions of the American Philosophical Society* (n. s.), XXXXV, n.º 4 (1955), pp. 329-395. La mecánica celeste de Kepler se discute en J. L. E. Dreyer, *History*, ya citado en Textos generales; Gerald Holton, “Johannes Kepler’s universe: Its physics and metaphysics”, *American Journal of Physics*, XXIV (1956), pp. 340-351; y Alexandre Koyré, “La gravitation universelle, de Kepler à Newton”, *Archives Internationales d’Histoire des Sciences*, XXX (1951), pp. 638-653. El sistema de Borelli se describe en Angus Armitage, “Borelli’s hypothesis’ and the rise of celestial mechanics”, *Annals of Science*, VI (1950), pp. 268-282, y en Alexandre Koyré, “La méchanique céleste de J. A. Borelli”, *Revue d’Histoire des Sciences*, V (1952), pp. 101-138. La obra de Robert Hooke es abordada en relación con la de Newton por Louise D. Patter son, “Hooke’s gravitation theory and its influence on Newton”, *Isis*, XL, (1949), pp. 327-341, y XLI (1950), pp. 32-45, y de forma más incisiva y profunda, gracias a la ayuda de un documento inédito, por Alexandre Koyré, “An unpublished letter of Robert Hooke to Isaac

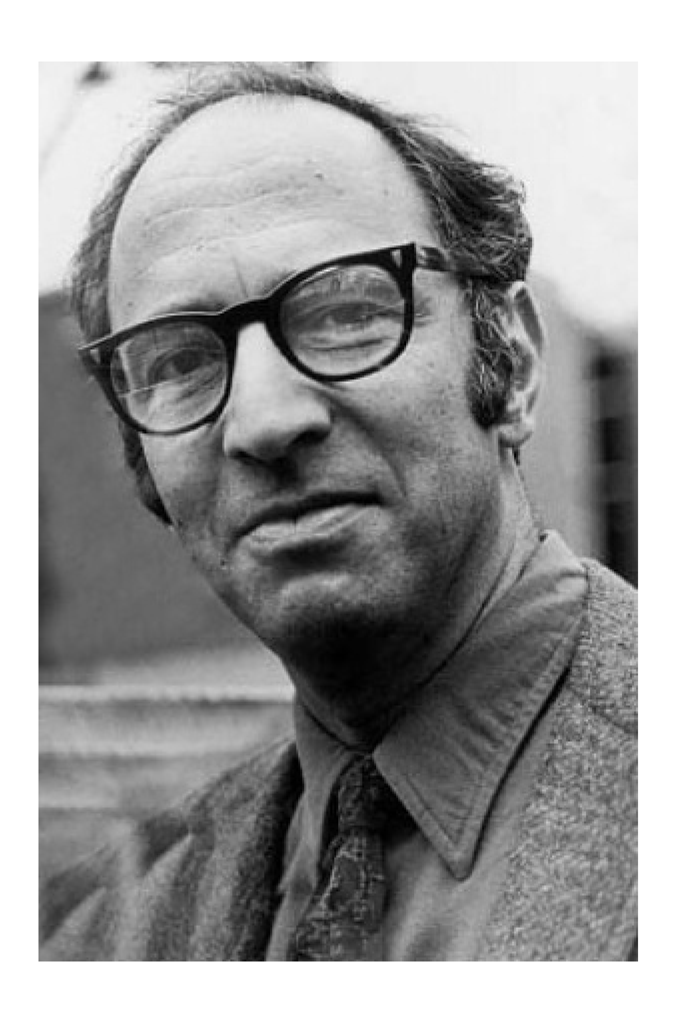
Newton”, *Isis*, XLIII (1952), pp. 312-337. Un buen número de documentos que iluminan la obra de Hooke se hallan recogidos en R. T. Gunther, *Early science in Oxford*, 14 vols., Oxford, 1920-1945, particularmente en los vols. VI y VIII.

En casi todas las fuentes bibliográficas citadas en el apartado correspondiente a Textos generales puede hallarse una guía para adentrarse en la vasta producción de Newton. No obstante, mi propio enfoque sobre el atomismo newtoniano y la subestructura metafísica de los *Principia* deriva parcialmente de otro grupo de trabajos, entre ellos los de Florian Cajori, “Ce que Newton doit à Descartes”, *L’Enseignement Mathématique*, XXV (1926), pp. 7-11, y “Newton’s twenty years’ delay in announcing the law of gravitation”, en *Sir Isaac Newton*, edición a cargo de la History of Science Society, Baltimore, 1928; A. R. Hall, “Sir Isaac Newton’s note-book, 1661-65”, *Cambridge Historical Journal*, IX (1948), pp. 239-250; Alexandre Koyré, “The significance of the newtonian synthesis”, *Archives Internationales d’Histoire des Sciences*, XXIX (1950), pp. 291-311; Thomas S. Kuhn, “Newton’s ‘31st Query’ and the degradation of gold”, *Isis*, XLII (1951), pp. 296-298, y “Preface to Newton’s optical papers”, en I. B. Cohen, ed., *Isaac Newton’s letters and papers on natural philosophy and related documents*, Cambridge, Mass., 1958, y S. I. Vavilov, “Newton and the atomic theory”, en *The Royal Society Newton Tercentenary Celebrations*, Cambridge, 1947. Fuentes originales de gran interés son Isaac Newton, *Mathematical principles of natural philosophy*, edición de Florian Cajori, Berkeley, Calif., 1946 [modernización de una precedente trad. al inglés de los *Principia* efectuada por Motte en 1728; de la edición a cargo de F. Cajori existe una reimpresión en 2 vols. efectuada en 1962], y *Opticks*, edición de I. B. Cohen, Nueva York, 1952.

APÉNDICE TÉCNICO

R. H. Baker, *Astronomy* (citado antes en Capítulo 1) discute la ecuación del tiempo, la precesión de los equinoccios, los eclipses y las fases de la

luna desde un punto de vista moderno. Sir Thomas L. Heath, *Aristarchus* (ya citado en Capítulo 1) y J. L. E. Dreyer, *History* (citado antes en Textos generales) contienen gran cantidad de información histórica sobre todos los temas indicados, excepción hecha del primero de ellos, para el que se consultará con provecho A. Rome, “Le problème de l’equation du temps chez Ptolémée”, *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, Serie 1, LIX (1939), pp. 211-224. Heath y Dreyer también abordan el tema de las determinaciones antiguas de las dimensiones astronómicas, sobre las que también puede consultarse Aubrey Diller, “The ancient measurements of the earth”, *Isis*. XL (1949), pp. 6-12. Pueden encontrarse detalles adicionales acerca de modificaciones introducidas por los árabes en el tratamiento del problema de la precesión de los equinoccios en Francis J. Carmody, *Al-Bitrûjî. De motibus coelorum*, Berkeley, Calif., 1952, y “Notes on the astronomical works of Thâbit b. Qurra”, *Isis*, XLVI (1955), pp. 235-242.



THOMAS SAMUEL KUHN (Cincinnati, 18 de julio de 1922 - Cambridge, 17 de junio de 1996) fue un historiador y filósofo de la ciencia estadounidense, conocido por su contribución al cambio de orientación de la filosofía y la sociología científica en la década de 1960.

Kuhn se doctoró en física en la Universidad Harvard en 1949 y tuvo a su cargo un curso académico sobre la Historia de la Ciencia en dicha universidad de 1948 a 1956. Luego de dejar el puesto, Kuhn dio clases en la Universidad de California, Berkeley hasta 1964, en la Universidad de Princeton hasta 1979 y en el Instituto Tecnológico de Massachusetts hasta 1991.

Autor de los libros *La revolución copernicana* (1957), *La función del dogma en la investigación científica* (1961), *Segundos pensamientos sobre paradigmas* (1970), *La tensión esencial* (1977), *La teoría del cuerpo negro*

y la discontinuidad cuántica (1978). Su pensamiento quedó plasmado fundamentalmente en la obra *La estructura de las revoluciones científicas* (1962).

Notas

[*] Desde el punto de vista astronómico, las estrellas constituyen un punto de referencia temporal más adecuado que el sol. No obstante, en la escala de tiempos establecida a partir de las estrellas la longitud del día solar aparente sufre una variación del orden del minuto según las diferentes estaciones. Si bien los astrónomos de la antigüedad estaban perfectamente al tanto de esta ligera pero significativa irregularidad, no desarrollaremos aquí este tema. Las causas de tal variación y sus efectos sobre la definición de una escala temporal se discuten en la sección 1 del Apéndice técnico. <<

[*] Entendemos aquí por “distancia” la “distancia angular”, es decir, el ángulo que forman dos semirrectas que arrancan del ojo del observador y van hasta los dos objetos celestes cuya separación desea medirse. Las distancias angulares son las únicas directamente medibles para el astrónomo, es decir, las únicas que puede efectuar sin necesidad de cálculos fundamentados sobre alguna teoría de la estructura del universo. <<

[*] Observaciones efectuadas con varios años de intervalo muestran que la posición del polo entre las estrellas varía con gran lentitud (alrededor de 1° cada 180 años). Por el momento prescindiremos completamente de este lento movimiento que forma parte de un efecto conocido bajo el nombre de precesión de los equinoccios, para abordarlo en la sección 2 del Apéndice técnico. Aunque los astrónomos de la antigüedad tuvieron conocimiento de este fenómeno desde el siglo II antes de nuestra era, ha desempeñado un papel secundario en la elaboración de sus teorías astronómicas. Prácticamente no modifica el resultado de las observaciones efectuadas dentro de un corto intervalo de tiempo. El polo norte celeste siempre ha estado situado a la misma distancia sobre el horizonte del punto cardinal norte, aunque las estrellas próximas al polo celeste varían con el transcurso del tiempo. <<

[1.1] Sir Thomas L. Heath, *Greek astronomy*, Library of Greek Thought, Londres-Dent, 1932, pp. 5-7. <<

[1.2] Platón, *Timeo*, 34b. <<

[2.1] Vitrubio, *De la arquitectura*, IX. <<

[2.2] Sir Thomas L. Heath, *Aristarchus of Samos*, Clarendon Press, Oxford, 1913, p. 140. <<

[3.1] Aristóteles, *Del cielo*, 279^{a}6-17. <<

[3.2] Aristóteles, *Del cielo*, $296^{b}8$-$298^{a}13$. <<

[3.3] Sir Thomas L. Heath, *Greek astronomy*, pp. 147-148. <<

[3.4] Aristóteles, *Del cielo*, 310b2-5. <<

[3.5] Aristóteles, *Física*, 213ª31-34. <<

[3.6] Aristóteles, *Del cielo*. 270b1-24. <<

[3.7] Jean Piaget, *La causalité physique chez l’enfant*, Librairie Félix Alcan, París, 1927, pp. 122-123. <<

[3.8] Heinz Werner, *Comparative psychology of mental development*, Follett, Chicago, 1948, pp. 171-172. <<

[3.9] Aristóteles, *Física*, 208b8-22. <<

[4.1] San Agustín, *Enquiridión*, 9 (3), Migne *P. L.*, XI, 235-236. <<

[4.2] Santo Tomás de Aquino, *Commentaria in libros Aristotelis “De caelo” et “De mundo”*, en *Opera omnia*, III, Sacra Congregatio de Propaganda Fide, Roma, 1886, p. 24. <<

[4.3] Santo Tomás de Aquino, *Summa theologica*, 1.68.3. <<

[4.4] Santo Tomás de Aquino, *Summa theologica*, 3.57.1-4. <<

[*] La novena esfera, que aparece a lo largo de toda la astronomía medieval, fue añadida por los astrónomos árabes a la antigua cosmología de las ocho esferas para explicar la precesión de los equinoccios y el movimiento del polo celeste (cf. sección 3 del Apéndice técnico). En el sistema árabe, la revolución cotidiana efectuada por la esfera de las estrellas en el sistema antiguo la lleva a cabo dicha novena esfera. <<

[4.5] Charles H. Grandgent, *Discourses on Dante*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1924, p. 93. <<

[4.6] Dante, *Convivio*, II, III. <<

[4.7] Ibid. <<

[4.8] Nicolás de Oresme, *Le livre du ciel et du monde*, edición de Albert D. Menut y Alexander J. Denomy, en *Mediaeval Studies*, III-V, Pontifical Institute of Mediaeval Studies, Toronto (1941-1943), IV, p. 243 [Segunda edición: University of Wisconsin Press, Madison, Wis., 1968]. <<

[4.9] Ibid., p. 272. Existe una excelente traducción inglesa que incluye, entre otros, este pasaje y los siguientes del comentario de Oresme: Marshall Clagett, “Selections in Mediaeval mechanics”, Folleto mimeografiado, University of Wisconsin, Madison, Wis. [Cf. ahora Marshall Clagett, *Science of mechanics in the Middle Ages 1200-1400*, Medieval Science Publications 4, University of Wisconsin Press, Madison, Wis., 1959]. <<

[4.10] Ibid., p. 273. <<

[4.11] Resumido de Marshall Clagett, “Selections in Medieval mechanics”, pp. 35-39, con permiso del autor. El texto original se halla en Jean Buridan. *Quaestiones super octo libros physicorum*, Paris, 1509, 8.12. <<

[4.12] Jean Buridan, *Quaestiones* (Clagett, “Selections”, p. 40. <<

[4.13] *Mediaeval Studies*, IV, p. 171. <<

[4.14] Alfred North Whitehead, *Science and the Modern World*, MacMillan, Nueva York, 1925, p. 19. <<

[4.15] Tomo la cita de Jonh Herman Randall, Jr., *The making of the modern mind*, Houghton Mifflin, Boston, 1940^2, p. 213. <<

[4.16] Sir Thomas L. Heath, *A history of Greek mathematics*, Clarendon Press, Oxford, 1921, I, p. 284. <<

[4.17] Tomo la cita de Edward W. Strong, *Procedures and metaphysics*, University California Press, Berkeley, 1936, p. 43, que a su vez la toma de Thomas Taylor, *The philosophical and mathematical commentaries of Proclus on the First Book of Euclid's Elements*, Londres, I, 1788, y II, 1789.
<<

[4.18] Marsilio Ficino, *Liber de Sole*, en Marsilio Ficino, *Opera*, Enrique Petrina, Basilea, 1576, I, 966. <<

[4.19] Tomo la cita de Edwin A. Burtt, *The metaphysical foundations of modern physical science*, Harcourt, Brace, Nueva York, 1932[2], p. 48, que reproduce un fragmento de las primeras controversias de Kepler. <<

[5.1] Todas las citas del presente capitulo se refieren al Prefacio y Libro I de N. Copérnico, *De revolutionibus orbium caelestium*, 1543, según la edición de Alexandre Koyré, basada en el texto de Thorn, 1873 (Félix Alcan, París, 1934; reproducida ahora en Librairie Scientifique et Technique, París, 1970). Para las dificultades inherentes al uso copernicano de la palabra *orbs*, cf. Edward Rosen, *Three Copernican treatises*, Columbia University Press, Nueva York, 1939, pp. 13-16.1. <<

[6.1] Tomo la cita de Francis R. Johnson, *Astronomical thought in Renaissance England*, Johns Hopkins Press, Baltimore, 1937, p. 207, modernizado la ortografía y la puntuación como en las demás citas del presente capítulo. <<

[6.2] Guillaume de Salluste Du Bartas, *La semaine ou la création du monde*, Quatrième Journées, Paris, 1578, pp. 105-106. <<

[6.3] Tomo la cita de Dorothy Simpson, *The gradual acceptance of the copernican theory of the universe*. Nueva York, 1917, pp. 46-47, que procede del *Universae naturae theatrum*, Frankfurt, 1597, de Bodin. <<

[6.4] Tomo la cita de Andrew D. White, *A history of the warfare of Science with theology in christendom*, Appleton, Nueva York, 1896, I, p. 126. <<

[6.5] Ibid., pp. 126-127, que procede de los *Initia doctrinae physicae*, de Melanchthon. <<

[6.6] Ibid., p. 127. <<

[6.7] John Donne, “Ignatius, his conclave”, en *Complete poetry and selected prose of John Donne*, edición de John Hayward, The Nonesuch Press, Bloomsbury, 1929, p. 365. <<

[6.8] Ibid., p. 202. <<

[6.9] Jonh Milton, *Paradise lost*, Lib. I, V. 26. <<

[6.10] Nicolás de Oresme, *Le livre du ciel et du monde*, en *Mediaeval Studies*, IV, p. 276. <<

[6.11] Tomo de la cita de James Brodrick, *The life and work of blessed Robert Francis Cardinal Bellarmine, S. J.*, Burn Oates and Washbourne, Londres, 1928, II, p. 359. <<

[7.1] Robert Hooke, *An attempt to prove the motion of the earth from observations*, John Martyn, Londres, 1674, reproducido en R. T. Gunther, *Early science in Oxford* (edición privada), Oxford, 1931, VIII, pp. 27-28. <<

[7.2] Newton, *Opticks*, 1730[4], Dover Publications, Nueva York, 1952, p. 401. <<

[7.3] Ibid. <<

[7.4] Newton, *Mathematical principles of natural philosophy*, edición de Florian Cajori, University of California Press, Berkeley, 1946, p. XVIII. <<

[7.5] Newton, *Opticks*, pp. 400-401. <<